Ignis Mutat Res

Penser l'architecture, la ville et les paysages au prisme de l'énergie | Session 1

Reforme

Rapport final | Equipe Reforme

Avril 2014

Partie 3. Les Métamorphoses 163
Conclusion #1 : scénarios globaux 164
Scénariser le long terme 165
Les scénarios Reforme 166
Conclusion #2 : réforme en France 169
Introduction 169
Remembrer les régions selon l'énergie ? 170
De la science (politique) 177
Les Infrastructures Solaires Urbaines 179
Une utopie locale pour la solarisation 179
Premier principe 179
Deuxième principe, stocker 180
Troisième principe, contenir 180
Dimensionnement des ISU 181
Quelques représentations des ISU 186

Cas pratiques pédagogiques 193
DPEA Architecture Post-Carbone 194
Introduction 194
Enseignements de projet 195
La modernité après 202
Introduction 202
Le 30-30 & le 30-30scope 203
Pédagogie du projet 212
Influence sur un enseignement contemporain 215
Solar Decathlon 235
Contexte 235
Projet Astonyshine 236
Projet « LivLib » 240

Annexes 241
Compléments pour les Représentations 242
Extrait d'état de l'art des représentations 242
Structure de données pour l'outil Reforme 246
Compléments pour la Formalisation 248
Espace vectoriel de l'énergie 248
Algèbre de la géonergie 252
Démolition sélective 264
Compléments pour les Métamorphoses 272
Trajectoires de solarisation équilibrées 272
Cartographie de la demande énergétique 280

Glossaire 283

Bibliographie 286

Cas pratiques pédagogiques

Ils relatent les liens étroits que le projet *Reforme* a entretenu avec :

- La mise en place et la première promotion 2013-2014 du DPEA Architecture Post-Carbone à l'ENSAVT ;
- Les questionnements et les évolutions pédagogiques de la modernité enseignée à l'ENSAPB et notamment le projet du 30-30 ;
- Les réflexions constructives et architecturales dans le cadre des participations au Solar Decathlon avec l'ENSAPM

DPEA Architecture Post-Carbone

« *La construction, même durable, de nos villes et de nos bâtiments présuppose beaucoup d'hypothèses :*

- *la permanence de la croissance*
- *l'abondance garantie d'énergie bon marché*
- *la substitution aisée des énergies fossiles par des énergies renouvelables*
- *la résolution des problèmes sociaux par des constructions nouvelles*
- *la pérennité de nos styles de vie*
- *la continuité de nos systèmes politiques et économiques*

Les conséquences physiques et humaines qui découlent des profondes transformations environnementales en cours imposent à elles seules de réenvisager la façon dont nous faisons l'architecture et la ville. »

Dennis Meadows,
«*Preparing Cities for the Age of Declining Oil*»,
Conférence inaugurale du programme *Ignis Mutat Res*,
novembre 2011.

Introduction

Une formation née dans le sillage de IMR

Le contenu pédagogique du *DPEA Architecture post-carbone* a été développé au cours des années 2011 et 2012. La première promotion a débuté en septembre 2013 à l'Ecole d'Architecture de la Ville et des Territoires à Marne-la-Vallée. Le cadre général de la formation est le suivant :

• formation de 3ème cycle
• s'adressant à des architectes diplômés
• se fondant sur les spécificités de la formation des architectes
• partenariat avec l'*Ecole des Ponts ParisTech*, double diplôme
• complémentarité entre outils et conception
• complémentarité entre cours et projet
• caractère prospectif et exploratoire
• en prise directe avec les demandes du monde de la construction
• multi-échelle: du composant à l'îlot

Eléments du programme d'enseignement

Organisation

Programme des séminaires de l'année 2013-2014

Enseignements de projet

Deux projets en lien étroit avec Reforme

Nous décrivons dans ce qui suit deux enseignements de projet, nés en lien étroit avec les avancées de recherche du projet *Reforme*. Ces deux exercices présupposent en effet :

- Des adéquations et des réflexions fortes avec les questions climatiques ;
- Une appréciation par l'étudiant de la *demande* énergétique de son projet sur un certain périmètre d'usage ;
- La scénarisation de dispositifs de *stoks* et d'*offre* ;
- La mise en place de *représentations* novatrices au cours de l'élaboration du projet (diagrammes de Sankey, plans de récolte, …

Projet Cobaye

Enoncé du sujet

L'exercice a pour objet la définition d'une architecture de petite dimension, modeste mais précise, mise en forme spécifiquement pour une combinaison unique de lieu et d'usage. Elle pourra être nouvelle ou, au contraire, se greffer sur une construction existante. Elle permettra alors d'améliorer, de modifier, voire de détourner l'usage de l'architecture initiale.

Greffe ou nouvel organisme, ce petit projet reste le prétexte à l'invention concrète d'une organisation matérielle complètement aboutie et d'assemblages réfléchis et résolus. Cette organisation matérielle et concrète aura ici pour objectif, au-delà des vertus classiques et incontournable de l'architecture, de réduire radicalement l'empreinte énergétique du projet.

On s'intéressera autant à la consommation énergétique nécessaire à l'établissement d'un endoclimat favorable au sein d'un exoclimat spécifique qu'au contenu énergétique des matériaux et produits mis en œuvre.

L'exercice permettra donc d'imaginer puis de dessiner et enfin de valider numériquement comment médiation climatique, frugalité énergétique et nécessités physiques de la construction (propriétés physiques des matériaux, gammes des opérations et transformations possibles avec ces matériaux, économie de moyens, …) peuvent interagir pour alimenter la forme et l'usage du projet.

Nous vous demandons de créer une architecture minimale, un *tonneau de Diogène* énergétique. Il s'agit d'un lieu de travail et de vie, d'une surface limitée à 20m² et/ou 50m³ intérieur. Vous vous intéresserez à ce seul élément, sans hypothèse quant à sa multiplication potentielle.

On devra pouvoir aussi y assurer les fonctions essentielles de vie : se laver et cuisiner. Ce fragment sera étudié parallèlement dans dix environnements climatiques distincts qui seront imposés aléatoirement à chacun d'entre vous :

1. Abu Dhabi (UAE)
2. Agadir (Maroc)
3. Asunción (Paraguay)
4. Beijing (Chine)
5. Reykjavik (Islande)
6. Caracas (Venezuela)
7. Font-Romeu (France)
8. Fort McMurray (Canada)
9. La Hague (France)
10. Lagos (Nigéria)

Dix villes, dix climats, dix modes de vie… Votre travail sera articulé en trois étapes. Il sera d'abord nécessaire d'analyser le climat de votre site:

- températures maximales et moyennes,
- humidité relative et précipitations,
- éclairement direct et diffus
- ensoleillement, intensité et position
- direction et intensité du vent (voire identification d'évènements extrêmes)
- et de le comparer à celui de Marne la Vallée sous la forme de tableaux, croquis et d'un cadran solaire adapté aux deux localisations.

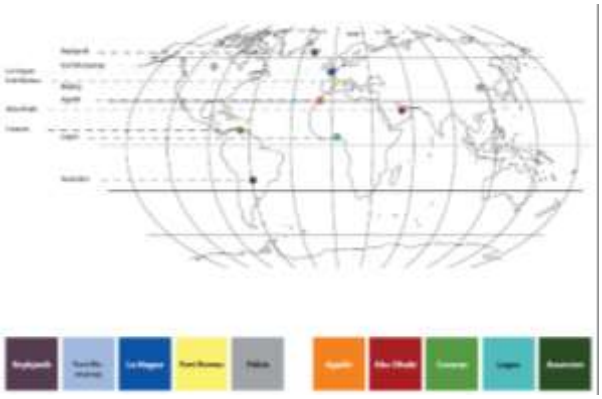
Vous tacherez également de caractériser les dégré-jours pertinents en 2015 et 2050 (selon une température de consigne basse et éventuellement une haute). Vous tirerez de cette analyse les principes auxquels devra répondre le projet.

Dans un second temps vous imaginerez le projet comme un volume et comme une membrane, comme un espace et comme sa limite. Cet aspect tridimensionnel sera traité sous la forme de plusieurs maquettes d'étude (au minimum trois) au 1:50, accompagnées de diagrammes, de croquis à l'échelle et d'une note qui précise le fonctionnement, qui décrivent et explorent l'emploi de matériaux variés, sous la forme d'alternatives contrastées, et justifie ainsi l'emploi de des procédés constructifs raisonnés.

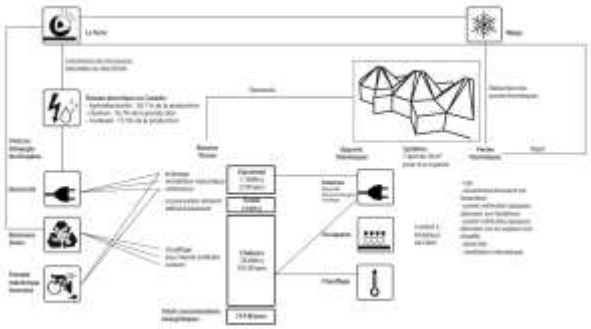
A ce stade, vous essaierez idéalement d'estimer les besoins énergétiques selon les usages (chaud, froid, etc.) selon les mois. En fonction des approvisionnements énergétiques renouvelables choisis, vous évaluerez les productions mensuelles. Vous estimerez ainsi les degrés d'autonomie atteint selon les mois. Vous tacherez parallèlement d'estimer le coût énergétique de la construction (énergie grise ou incorporée).

La mise au point du projet dans se concentrera sur l'étude des matériaux et des modes d'assemblage, sur l'intégration des problématiques énergétiques, dans le cadre des objectifs définis dans les phases précédentes du projet. Elle sera élaborée à travers une maquette du projet au 1:20, ou plusieurs, coupes et plans complets à l'échelle 1:1.

Vous conserverez méthodiquement la trace des évolutions du projet, sous la forme d'un carnet d'esquisses, de diagrammes, de croquis, de textes, de photos de maquettes et d'impressions de version provisoires des hypothèses que vous serez amenées à explorer.



La carte des dix situations de projet du projet Cobaye (source DPEA Architecture post-carbone)



Un extrait de rendu : visualisation de la demande énergétique (source DPEA Architecture post-carbone)

Enseignements pédagogiques

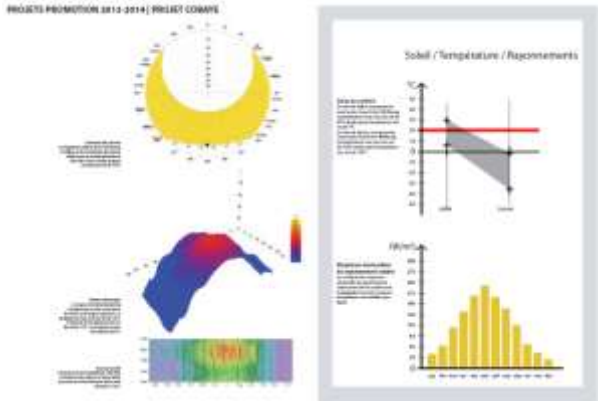
L'exercice pose une série de questions. Comment l'architecture réagit-elle aux différentes conditions géographiques et de votre choix :

- par les espaces et les usages qu'elle génère ?
- par les formes d'efficacités énergétiques qui vous semblent devoir primer
- par la prise en compte des déplacements disponibles selon les contextes géographiques et territoriaux que vous choisirez

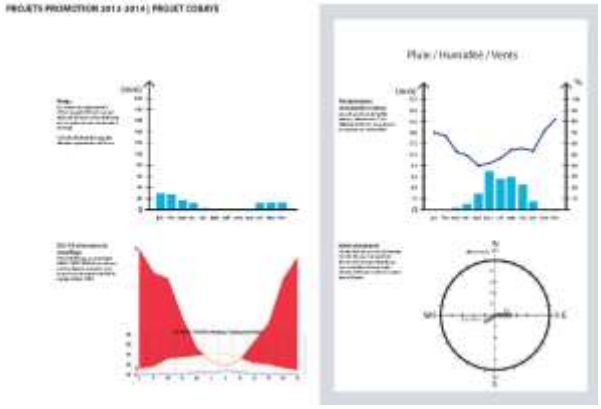
Quelles morphologies –à toutes les échelles—peuvent résulter de ces réflexions ? Quels matériaux, lourds ou légers, linéaires, surfaciques ou volumiques et modes d'assemblage répondent à ces préoccupations ? Quelle est la matérialité du projet ? Comment collecte-t-on l'énergie et à partir de quelles sources ? En fonction du climat et des usages, quelle adéquation trouver entre la captation d'énergie et les déperditions engendrées par un objet de petite dimension (syndrome du nouveau-né)
Comment ces résultats sont-ils obtenus de la façon la plus frugale possible ? Comment cette architecture saura-t-elle s'adapter à l'horizon 2050 ? (et vous tacherez de scénariser les incertitudes possibles et les réponses de votre projet à l'évolution du contexte)

Maquette de rendu du projet situé à Caracas

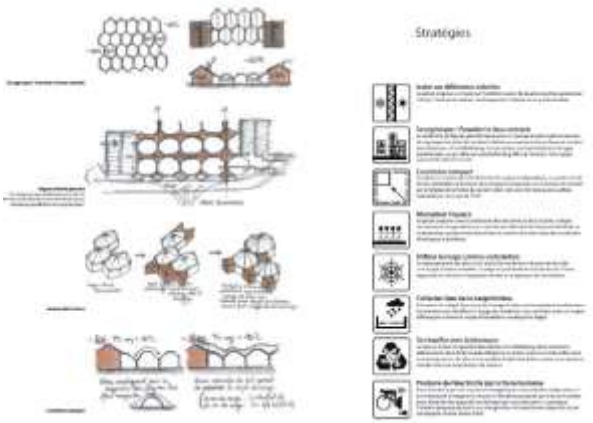
Extrait de rendu



Un extrait de rendu : analyse climatique (source DPEA Architecture post-carbone)



Un extrait de rendu : analyse climatique (source DPEA Architecture post-carbone)



Un extrait de rendu (source DPEA Architecture post-carbone)

Projet long : « 2000 personnes à 2000 watt »

Enoncé du sujet

L'exercice a pour objet la définition d'une architecture, ayant capacité à proposer une nouvelle typologie urbaine.

A horizon 2050 et dans un contexte géographique choisi, le projet devra élaborer une réponse morphologique et constructive, permettant d'assurer une autonomie et une robustesse d'approvisionnement énergétique pour des tissus neufs et/ou existants.

L'exercice permettra ainsi d'explorer des stratégies architecturales et urbaines permettant d'augmenter les capacités de production d'énergie des tissus urbains en fonction des situations climatiques et topographiques.

Le projet devra explorer de façon documentée :

Les capacités d'offre énergétique locale (de production d'énergies renouvelables) et élaborer des réponses pertinentes de récolte de cette énergie. A une emprise et une topographie donnée, quelles sont les stratégies permettant d'augmenter la « solarisation » des tissus urbains ?

Le contrôle de la demande (ou de la consommation énergétique) en analysant à la fois les valeurs de consommation individuelle et la densité urbaine. Comment mettre en adéquation densité et autonomie énergétique ?

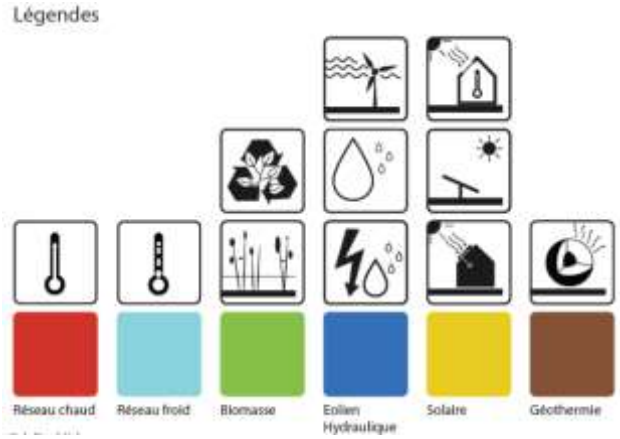
Les capacités de stockage énergétique selon les différents besoins finaux en situation urbaine (chaleur, froid, électricité, alimentation et mobilité) ;

Pour illustrer les points 1) et 2) et à titre d'exemple, l'équipe *Reforme* (dans le cadre de la première session du programme *Ignis Mutat Res*) a identifié les corrélations suivantes en fonction de la latitude. En fonction de l'emplacement du projet, ces valeurs devront néanmoins être précisées et scénarisées à horizon 2050.

Toujours dans le cadre du programme *Ignis Mutat Res*, l'équipe *Réforme* a analysé cette question. Vous pourrez notamment interpréter la relation ci-dessous pour le dimensionnement des points 1) et 3).

Notez aussi que l'emprise d'usage est un terme important de cette relation d'équilibre. Vous devrez là-encore cette valeur de façon contextuelle (à titre d'exemple, l'emprise d'usage associé au logement est d'environ 40m² en Europe alors que cette valeur est plus proche de 15m² dans les pays émergents, et avec de grande disparité).

En 2050, au sein de votre contexte géographique et urbain, vous identifierez des hypothèses de consommation individuelle d'énergie selon quatre besoins primordiaux : alimentation, chaleur, froid et mobilité. (en W/pers)



Un extrait de rendu (source DPEA Architecture post-carbone)

Un extrait de rendu : scénarisation en 2050 en Mongolie (source DPEA Architecture post-carbone)

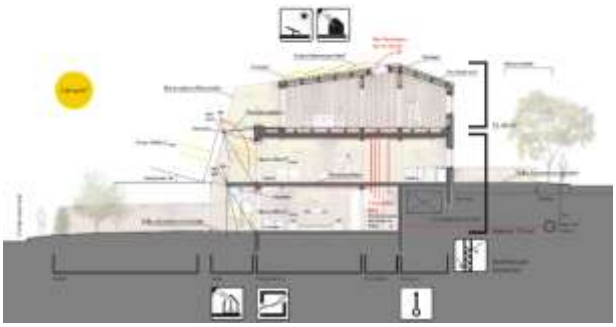
Parallèlement, votre projet devra également interroger la question constructive et l'obsolescence du bâti. A une échelle intermédiaire entre architecture et urbain, cette typologie devra dès lors proposer un dispositif efficace sur la totalité de son cycle de vie. Votre projet devra ainsi donc documenter les stratégies constructives permettant de réduire le poids de l'énergie grise, amortie dans l'évaluation de la consommation individuelle.

A titre d'exemple, la consommation d'énergie primaire pour l'édification d'un logement en France est de l'ordre de 1000kWh/m² construit. Si l'emprise d'usage résidentielle est d'environ 40m² par personne, le « coût constructif » par individu est de l'ordre de 40 000kWh pour la production de l'espace. Si la durée de vie de ce bâti est de 40 ans, alors l'amortissement est donc de 1000kWh par an et par personne soit environ 114W par personne.

Première partie : énergie

Nous vous demandons de proposer un ilot ou une collection d'objets bâtis ou un édifice unique, multi-programmatique permettant d'assurer l'autonomie d'usage de 2000 personnes. Votre projet devra permettre d'assurer la globalité des usages spatiaux pour ses 2000 habitants : logement, bureaux, locaux d'artisanat, commerces et équipement public. En fonction des contextes, vous définirez l'allocation programmatique. Ces analyses puis vos choix permettront alors de statuer sur l'emprise d'usage des 2000 habitants. Faut-il prévoir 50m² par habitant ou 25m² ? La somme programmatique de l'édifice sera alors comprise entre 50 000m² et 150 000m².

En fonction du climat et de vos hypothèses culturelles et techniques, vous évaluerez une estimation de la demande énergétique de vos habitants. En 2050 et au sein de votre site, consommeront ils 5000W, 2000W ou 1000W ? Vous dresserez cette estimation en évaluant six postes : électricité, alimentation, chaleur, froid, mobilité et amortissement de l'énergie grise.



Un extrait de rendu : coupe à Neuchatel (source DPEA Architecture post-carbone)

A partir de la carte des usages, vous développerez une réflexion technique sur les méthodes possibles de captation de l'énergie solaire (comprenant les potentiels directs ou indirects comme l'éolien ou l'hydraulique) depuis votre édifice (et pour certains sites de la géothermie).

En fonction du contexte urbain et selon votre choix, vous statuerez alors sur une hypothèse d'autonomie énergétique. Vous serez alors en mesure d'évaluer la hauteur équivalente en appliquant la relation proposée ci-haut.

Vous entamerez alors une réflexion morphologique pour l'insertion de votre édifice dans un contexte que vous aurez défini et de l'étude de site que vous aurez effectuée.
Seconde partie : forme et matière
La seconde partie d'élaboration du projet consistera dès lors à développer des stratégies constructives permettant d'optimiser le coût énergétique de votre construction (et de ses sous-parties) du point de vue de sa matérialité et de sa mise en œuvre.

Pour chaque stratégie, vous testerez les répercussions sur votre première estimation du sixième poste de consommation individuelle, à savoir l'énergie grise de votre édifice. Cette valeur sera divisée par la durée de vie que vous estimerez, selon la nature des matériaux employés et de votre choix de mise en œuvre. Cette valeur sera alors divisée par le nombre d'habitants. Vous pourrez alors évaluer la « dette constructive » de votre édifice en W par habitant.

Cette évaluation sera également un instrument d'arbitrage de design de ou des enveloppes de votre édifice : faut-il s'attacher par exemple à optimiser la réduction de la demande de chaleur pour le chauffage si le surcout énergétique d'une enveloppe sophistiquée est plus lourd ? Vous pourrez alors spécialiser votre projet dans des dualités du type lourd | léger, high tech | low tech, naturel | synthétique…

Cette question sera aussi directement relative à vos choix structurels et à la nature des schémas statiques que vous aurez définie. Vous intégrerez également une première approche des coûts énergétiques pour les technologies solaires ou de production renouvelable que vous aurez décidé d'installer.

Enfin, vous devrez également questionner la question des stockages énergétiques à l'échelle de l'édifice et ce, afin de préfigurer une adéquation entre offre énergétique (votre mix renouvelable intégré dans l'édifice) et demande énergétique (les courbes de charge des différentes consommations énergétiques).

Règles et sites

Pour ce projet « 2000 personnes à 2000W », vous serez en équipe de deux. Les cinq situations géographiques seront les suivantes :

1. Ulan Bathor (Mongolie)
2. Fès (Maroc)
3. Neuchâtel ou Marne-la-Vallée (Suisse)
4. Mexico (Mexique)
5. Tokyo (Japon)

Phase 1

1. Recherche et analyse urbaine : histoire organisation et forme présente ;
2. Analyse environnementale du site : climat, ressources, pollution ;
3. Analyse énergétique quantitative et qualitative : offre, demande, stockage ;
4. Formulation des hypothèses de base 2050 : alimentation, chaleur, froid, mobilité ;
5. Etablissement des documents de base : maquette physique et virtuelle 1/500, héliodon… ;
6. Mise en forme et présentation analyse et des hypothèses de travail.

Phase 2

1. Esquisse architecturale et urbaine, maquette 1/500 ;
2. Esquisses constructives, coupes ;
3. Estimation besoins énergétiques ;
4. Choix des stratégies de collecte d'énergies renouvelables ;
5. Mise en forme et présentation des esquisses.

Phase 3

1. Définition de stratégies constructives contrastées, minimum 3, coupes 1/100 et 1/50 ;
2. Comparaisons énergétiques ;
3. Mise au point individuelle de deux solutions, plans 1/100, coupes 1/20 ;
4. Maquette 1/100.

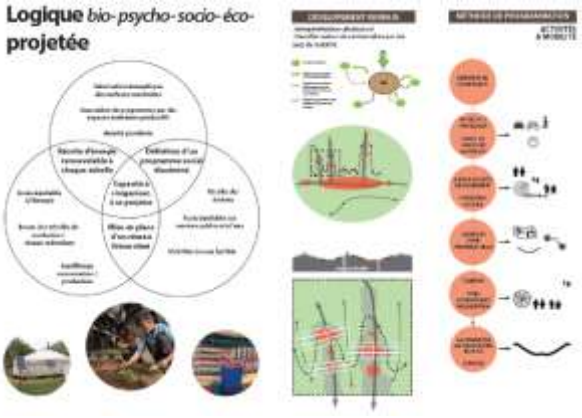
Phase 4

1. Reprise des maquettes ;
2. Reprise des dessins généraux et de détails ;
3. Reprise analyse et description énergétiques ;
4. Note de description des matériaux et des équipements ;
5. Synthèse et présentation graphique.

Phase 5 – Jury final

Un extrait de rendu : périmètre d'influence énergétique en Mongolie (source DPEA Architecture post-carbone)

Un extrait de rendu : coupe de récolte à Neuchatel (source DPEA Architecture post-carbone)



Un extrait de rendu : périmètre d'influence énergétique en Mongolie (source DPEA Architecture post-carbone)

Calculette énergie - morpho | janvier 2014 | version 0.1

Projet #2 | "2000 personnes à 2000W ?" | DPEA Architecture Post-Carbone | ENSAVT

Donnée de site

Gisement solaire horizontal moyen

1	Flux moyen	200	W/m²

Hypothèses du projet

Emprise d'usage

2.1	Logement	25	m²/pers
2.2	Activité	15	m²/pers
2.3	Equipement public	5	m²/pers
2	Total →	45	m²/pers

Rappel Société à 2000W

Identification de la demande énergétique

3.1	Chaleur →	690	W/pers
3.2	Froid	50	W/pers
3.3	Electricité	50	W/pers
3.4	Alimentation	300	W/pers
3.5	Mobilité	1 000	W/pers
3.6	Energie grise →	260	W/pers
3	Total →	2 350	W/pers

Calculette chaleur (3.1)

Chauffage	20	kWh/m².an
Cuisson	4	kWh/j.pers
ECS	10	kWh/j.pers

Calculette énergie grise (3.6)

Construction	1 500	kWh/m² construit
Obsolescence	30	ans

Rendement moyen de conversion solaire

4.1	Biomasse	5	% de la toiture et rendement moyen	1%
4.2	Photovoltaïque	40	% de la toiture et rendement moyen	15%
4.3	Solaire thermique	30	% de la toiture et rendement moyen	45%
4.4	Autres	5	% de la toiture et rendement moyen	10%
4.4	Fraction non productive →	20	% de la toiture	
4	Rendement moyen →	40	W/m²	

Conséquences projet

Cas 1 : je choisis mon autonomie

5	Autonomie visée	30	%
6	Nombre de niveaux max. →	2,6	niveaux
	Densité max. →	567	hab/ha

Cas 2 : je choisis ma hauteur

5	Nombre de niveau moyen	2	niveaux
	Densité →	444	hab/ha
6	Autonomie maximale →	38	%

La modernité après

Introduction

Enseigner *mieux* le projet d'architecture ? Où situer l'amélioration pédagogique dans l'enseignement de l'architecture aujourd'hui ?

Dans son ouvrage « L'architecture moderne », Alain Colquh'oun situe la fin de la modernité en 1965, Bernard Huet, dans sa dernière conférence à Belleville le 7 juin 2001, date et situe la fin la période moderne dès l'inauguration du couvent de La Tourette en 1953, Jean Patrick Fortin la datait au jour du premier choc pétrolier en 1973. La fin d'une énergie abondante et bon marché à usage occidental et sans conscience collective mondiale (incidence climatique, pollution, finitude des ressources) aurait sonné le glas de la période moderne. Nous sommes en 2014 ; 40 années de postmodernisme architectural se seront traduites, en réalité, par l'avènement de l'enseignement de l'architecture par le projet, selon des modalités aux fondements spécifiques. Pour l'évolution de cet enseignement, le recul critique du prisme de l'énergie permettra d'assumer de nouveaux choix.

Quelles sont les références de progression d'un enseignement du projet ? Les arguments de différenciation entre un enseignement sur le fond né de la modernité et un enseignement pré-moderne de la forme restent ils toujours à préciser ? Comment échapper, par exemple, à l'exercice de composition centrée, donc symétrique, des « neuf carrés[228] » ? …

J'ai appris de la recherche[229] de Michel Corajoud la manière dont Lenôtre appuyait géométriquement son travail de jardinier/paysagiste. Il y montre comment s'exercer au relevé sur le terrain, le conduit à passer de l'hypothèse de la déclinaison d'une grille au pas régulier, qui ferait de lui un concepteur classique, émule de la symétrie et de la stabilité, à l'hypothèse d'une conception baroque où se déploie la géométrie du rapport doré par l'inscription des angles et des figures dynamiques de la spirale et du pentagone.

Le croisement de considérations planaires, dues à l'inscription durable de traces de projet, ou programmatiques, en réponse à une maitrise d'ouvrage, et paysagères, sur les modifications induites par une matérialité vivante au profit de vivants, manifeste la complexité du projet versaillais. Michel Corajoud présume dans cette recherche que la science projectuelle de Lenôtre engage de notre part des investigations sur la coupe autant que sur le plan. Non pour confirmer un travail illusionniste d'une géométrie optique dévoyée, mais pour accéder à la cohérence d'une stratégie, territoriale, spatiale et artistique, de laquelle déduire un processus enseignable pour la formation d'un paysagiste de projet.

La grille favorise une expression abstraite par abscisse et ordonnée, indépendante du territoire où elle se développe. Globalisante, tout point lui appartient par multiplication ou division de son pas. Au contraire l'origine d'un système qui se développe vers l'infiniment grand ou l'infiniment petit procède d'un choix qui relève d'un fort déterminisme subjectif. Ce point d'ancrage n'a pas d'équivalence lors de l'emploi du découpage en « extrême et moyenne raison » remarqué par Euclide.

Quand Le Corbusier se propose de travailler sur un plan carré de plus de 20 mètres de côté il se différencie de Palladio en évitant la centralité du carré, le renforcement des médianes et leur symétrie. Le déplacement oblique de l'espace devient un enjeu architectural moderne rendu possible par la discontinuité du plan, sa liberté. La rampe continue est un élément du plan qui déplace le centre de l'édifice, relie tous les niveaux du sol au ciel et s'associe à la notion de promenade architecturale. De la dissociation du parcours du regard de celui du corps résulte une liberté « hors grille ».

Qu'en est-il de ces questions consubstantielles à la démarche projectuelle de l'architecte à l'heure du bilan Carbone ? Doit-on immédiatement renvoyer aux oubliettes des débats picrocholins ou esthétisant que je viens d'évoquer pour laisser place à l'avènement de l'architecture bioclimatique performante écocentrique et amnésique ?

[228] John Hejduk, Cooper Union (NY) dans les années 80', cité par Michel Kagan, Propos recueillis par Françoise Arnold et Daniel Cling, extraits de l'ouvrage "Transmettre en architecture. De l'héritage de Le Corbusier à l'enseignement de Henri Ciriani", paru en 2002 aux Éditions du Moniteur (248 pages).

[229] Un extrait de cette étude a été publié dans Les annales de la recherche, n° 18-19, 1983, sous le titre « Versailles : lecture d'un jardin »

Le 30-30 & le 30-30scope

Cohérence du cadre expérimental avec l'objet de la recherche.
Le cas pratique d'un studio d'architecture, lieu d'apprentissage du projet, sert de support à un questionnement sur l'évolution du rapport contemporain entretenu par pédagogie et milieu, compris sous l'angle de l'énergie.

Cadre académique du support pédagogique de l'expérimentation

Un enseignement du projet d'architecture en ENSA[230], à Paris-Belleville. Le studio « 30-30 », semestre 5 en 3ème année du cycle du diplôme d'études en architecture (DEEA), équivalent Licence de l'ENSAPB, est constitué autour d'un groupe de 25 élèves, encadrés par un enseignant structure et enveloppe, Jean Marc Weill[231], et le responsable du studio, Alain Dervieux, avec la collaboration de Raphaël Ménard et Paul Azzopardi, auteurs de l'outil pédagogique 30-30oscope.

L'expérience accumulée des années scolaires 2011-2012, 2012-2013 et 2013-2014 est sollicitée comme support d'expérimentation, d'analyse et de réflexion pour cette étude.

Légitimité de la démarche

Pourquoi une expérimentation pédagogique, pourquoi ce studio ? Actualité d'un exercice pédagogique, ou : le rapport entre énergie et espace par le plan libre.

Sous une conduite collective à laquelle je m'associe activement, le studio d'enseignement du projet d'architecture connu sous l'appellation 30 30, fait l'objet ou bénéficie depuis son invention (1980) :

- de plusieurs recherches financées par le BRA : *L'espace de l'architecture moderne* (C. Vié, H. Ciriani, A. Dervieux, avec différents rapports de recherches entre 1980 et 1989) et *L'espace 30 30, un enseignement moderne du projet moderne* (O. Gahinet et A. Dervieux), 1998-2000.

[230] École Nationale Supérieure d'Architecture.
[231] Jean Marc Weill est architecte dplg, formé à l'ENSA Nancy et ingénieur, CNAM et Harvard, professeur STA titulaire à l'ENSAPB. http://www.ceingenierie.fr/agence/equipe.php

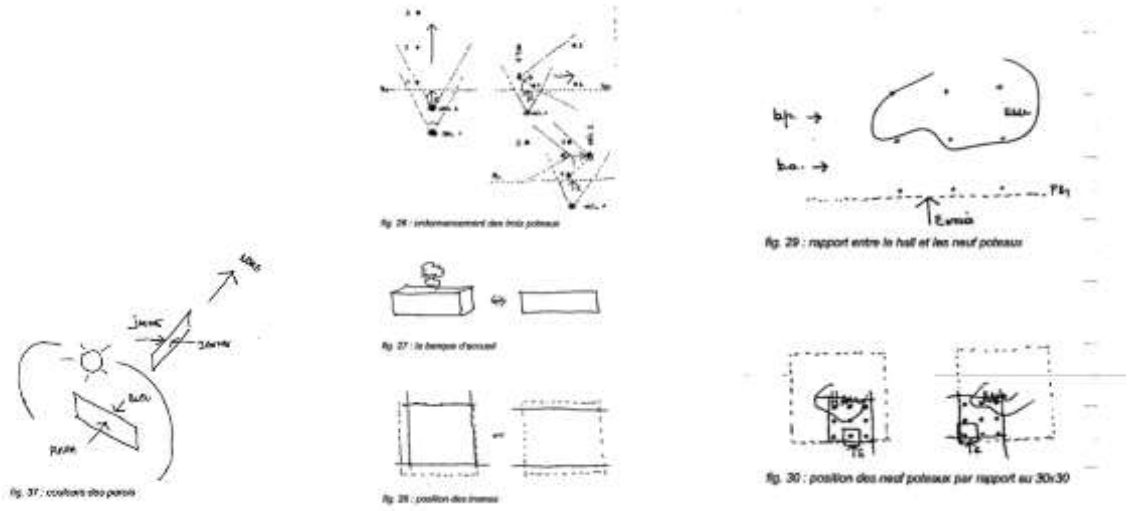


Illustration : travaux étudiants Ciel ENSAPB Mudri

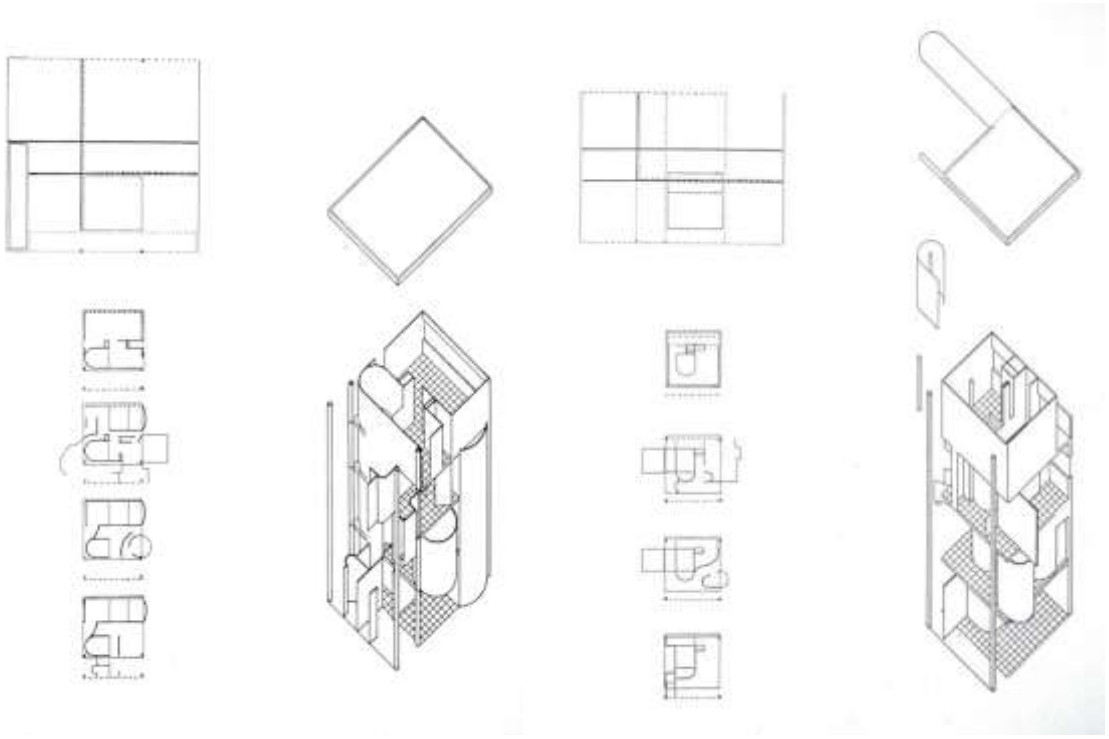


Illustration : extraits de deux recherches « L'espace de l'architecture moderne » : le thermos du projet des villas Meier de Le Corbusier, 1925 » et « 30mètres par 30 mètres ».

- D'expérimentations (2004-2007) avec Ljubica Mudri[232] (ingénieur, chercheur) sur les variations des mesures de la lumière (luminescence et luminosité) au cours de la conception d'un espace à la périphérie régulière et aux éclairements latéraux et zénithaux, par de micro caméras étalonnées.
- De développement du rapport structure, enveloppe et espace par convergence du chiffre et du trait dans l'enseignement conjoint du

[232] Diploma in Architecture from the University of Belgrade. PhD in Energy (Day lighting) from the École Nationale Supérieure des Mines de Paris. http://www.deluminaelab.com/download/presentation_deluminaelab.pdf

projet par un architecte et un ingénieur, avec Jean Marc Weill, depuis 2010.

Aujourd'hui une expérimentation mesurable du rapport entre les qualités lumineuses et thermiques d'un espace, avec ses qualités fonctionnelles et d'usage mises en rapport par le dessin d'un plan libre, est possible à mener. En effet, les recherches antérieures sur la nature de l'espace moderne, sur l'enseignement du plan libre, sur les mesures[233] de la lumière (comme facteur thermique et d'éclairement) préparent à l'étude de la coordination entre qualité spatiale et qualité thermique au service du projet. La maitrise du projet d'architecture suppose de ne pas inféoder ces notions l'une à l'autre et réciproquement. Le dessin, pris au sens strict du tracé du plan, peut régler le rapport de dépendance entre espace et énergie (reçue ou émise, à l'instant comme dans le passé et le futur). L'apprentissage du plan libre dans ce studio oriente et garantit par sa rigueur les expérimentations à mener dans ce domaine. Les conditions d'étude sont réunies et les outils d'expertise existent.

La principale hypothèse peut s'énoncer ainsi : Une expérimentation mesurable, du rapport simultané entre les qualités lumineuses et thermiques d'un espace avec ses qualités structurelles, fonctionnelles et d'usage, mises en rapport par le dessin d'un plan libre dans l'espace tridimensionnel, augmente la conscience projectuelle de l'étudiant. Elle traduit en ENSA, une pratique approfondie d'une interdisciplinarité hiérarchisée, dans l'enseignement du projet.

Conditions pratique de l'expérimentation.

À l'heure actuelle, la particularité de cet enseignement repose sur le refus de spécifier structure, enveloppe et architecture comme éléments hétérogènes à articuler. Dans un édifice à deux niveaux, le plan matériel en instance de définition du premier niveau sert à répartir la programmation en surface comme en sous-face et à développer une présence physique à la gravité contrôlée, ainsi qu'un déploiement de l'enveloppe chargé de contrôler les échanges avec le milieu où il se trouve. Les réactions en chaine ne sont pas hiérarchisées à priori. L'usage guide le dessin de l'espace qui guide celui du plan qui guide la répartition des efforts physiques qui guide le dessin de l'intériorité et ses limites ! Mais cet ordre logique est celui de la décomposition de l'apprentissage. L'interaction des éléments montre qu'une pensée hiérarchisée est nécessaire pour penser la complexité du projet mais que les éléments qui y participent sont interactifs et non hiérarchisés dans leurs valeurs. La démarche, peut débiter à un endroit quelconque, mais sa progression nécessite le recours à des synthèses partielles.

Dans l'objectif d'une amélioration pédagogique, plusieurs hypothèses peuvent être faites selon le semestre pendant lequel la relation de l'énergie au projet est posée. Dans l'exercice de projet L3 S5 : le 30 30, *il existerait une relation directe entre échanges thermiques quantitatifs (énergie captée, restituée, lumière, apport énergétique) et projet qualitatif de l'espace par le dessin (contour et incidences d'usage et de structure) du plan libre*. De manière complémentaire dans l'exercice de projet L3 S6 : 4 fois 1 égalent 5, *il existerait une relation directe entre échanges thermiques quantitatifs (énergie captée, restituée, lumière, apport énergétique) et projet qualitatif de l'espace par le dessin (topologie et incidences d'usage et de structure) de la coupe libre*. La combinaison potentielle de ces deux hypothèses conduirait à chercher comment un questionnement de l'enveloppe libre, comme combinaison du plan libre et de la coupe libre, serait à l'origine d'un concept pédagogique opérationnel et synthétique, utilisable dès le premier des deux semestres de troisième année.

Postulats du studio 30-30

Le principe du studio repose sur l'existence d'un volume aux contours volumétriques fixes (30mx30mx7m). Son exploration s'accompagne de la conception d'un espace, dédié aux usages qui traduisent le programme d'une bibliothèque publique, dans le mouvement même de sa découverte. À l'origine du travail la volumétrie est virtuelle. Dans un repère cardinal elle est définie par un carré qui ne présume pas du traitement des limites. Elle se matérialisera par l'arête d'un plan horizontal afin de suggérer le lieu de l'entrée.

Le travail initial de l'étudiant consiste à concevoir cette entrée. Il doit appréhender trois difficultés à surmonter : transgresser la périphérie du volume abordé (la présence architecturale), accompagner le passage du corps de l'extérieur à l'intérieur (l'usage), articuler la lumière solaire et la lumière[234] architecturale intérieure (la physique architecturale).

L'enveloppe de l'édifice fait l'objet d'un travail ultérieur. Dans une hiérarchie qui décompose l'articulation des espaces, les étapes chronologiques sont intitulées : L'entrée, (« Un poteau »), l'accueil (« 3 poteaux »), le cœur (hiérarchie des parcours principaux « 9 poteaux » accompagnés par l'escalier « Le hall »), établies en perspectives, puis les maquettes : « La maquette couleur, 1/200ème » répartie le programme par une figure spatiale, le plan libre ; « La maquette blanche, 1/100ème » est celle de l'intégration des usages à l'échelle du corps (parcours, de meuble, rangement et lecture); « La maquette meublée » comporte la face supérieure confortant l'éclairage zénithal ; « La maquette PH2 », avec enveloppe complète et lumière latérale ; « La maquette finale 1/50ème» figure la matière mise en œuvre conceptuellement au profit d'un questionnement de la matérialité.

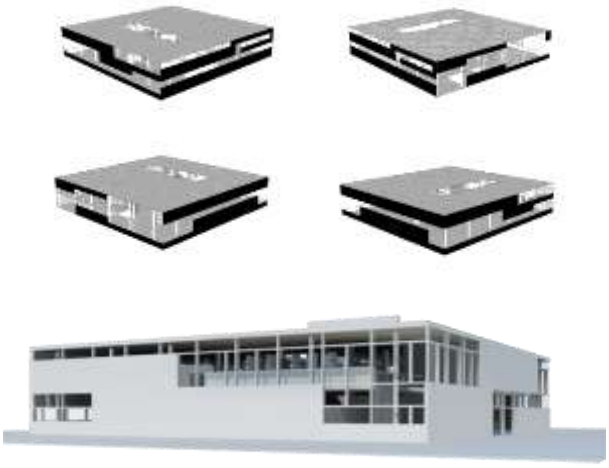
Cette décomposition inclut en particulier:

- La stratégie d'organisation du plan du sol *en diagonale* (par directions successives vers l'avant, nord, et vers le côté, est ou ouest) ou *en parallèle* (profondeur, vers le nord, par succession de directions est/ouest).
- La stratégie de relation entre niveau du sol et niveau supérieur.
-

Ces stratégies permettent de générer, de manière cohérente, une qualité d'enveloppe qui repose : sur les échanges lumineux (différenciées entre insolation et luminosité), visuels (sélection de vues pour chaque situation programmatique) et sur le contrôle des échanges thermiques.

Nous considérons que cette cohérence qualitative est un acquis du plan libre corbuséen, dont la manipulation progressive et consciente est proposée par cet exercice.

La façade de l'édifice n'apparaît comme question en soi qu'au moment de la recollection ultime. Synthétiquement les façades sont chargées de réaliser l'enveloppe et de nous conduire vers l'entrée, depuis toutes les approches.



Illustrations : dessin des façades rationalisant les nécessités de vue et de lumière exigées par l'espace intérieur et ses spécificités programmatiques (opaque/vide). Le travail, ici en cours, témoigne de la nécessité d'articulation entre les différentes faces du volume enveloppe. En particulier d'une dynamique y compris au passage des angles, vers l'entrée. Sans site, les questions de vis à vis, horizons urbains, etc., ne soutiennent pas la démarche du réglage de ces faces. L'enveloppe achevée montre comment les faces Nord Est, Ouest ainsi articulées (opaque et vitré) conduisent à l'entrée situé sur la face Sud

[234] Lumières que Le Corbusier se garde bien de différencier dans sa définition, « L'architecture est le jeu savant correct et magnifique des objets sous la lumière. », Vers une architecture, éditions Crès et Cie, Paris, 1923.

L'interprétation de l'enveloppe, perçue depuis l'intérieur (en maquette ou perspective) est conditionnée exclusivement par les effets qu'elle produit en sens unique. C'est la conséquence d'un enseignement réductionniste. D'un point de vue expérimental la mesure de l'interaction d'un corps étranger dans un milieu préexistant[235] est évidemment passionnante et explique l'usage[236] que font les architectes de l'Histoire de l'architecture quand ils la soumettent à l'analyse architecturale.

La façade ne participe pas d'un dialogue avec le site (il n'y en a pas) mais d'un monologue entre un édifice et son milieu. Le terme de réduction[237] est pédagogiquement revendiqué. Le réductionnisme sert ici à qualifier le plus précisément possible un rapport, mono orienté, situé au milieu d'un apprentissage de l'architecture par le projet. Il permet de se concentrer sur les données solaires, lumineuses, climatiques de la région Ile de France. Il est prévu d'expérimenter le studio à partir des données liées aux origines des étudiants Erasmus et en transfert.

Espace Structure Enveloppe

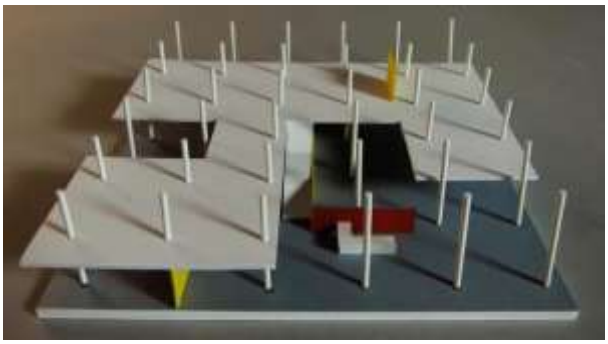
Ces trois axes de lecture des projets sont ceux que nous retenons pour élaborer l'exercice projectuel du studio : « 30-30, la maison du livre ». Cette triangulation, fruit d'une évolution récente, d'une envie pourtant ancienne, relève le défi[238] d'un enseignant du projet d'architecture contemporain. Différents collègues capables d'incarner la posture de l'ingénieur ont contribués aux expériences précédentes (Daniel Bernstein, Ljubica Mudri, Dominique Druenne[239]). C'est avec l'apport de Jean Marc Weill que la collaboration trouve sa pleine maturité.

Espace

L'espace comme mobile.

La notion d'espace est au cœur de la première recherche à laquelle j'ai participé comme étudiant puis comme diplômé et enseignant débutant : « L'espace de l'architecture moderne ». Avec d'autres études, françaises et étrangères,[240] les auteurs ont établis un corpus d'études et de définition qui ont affermit le déploiement d'un enseignement transposant de manière critique les acquis de la modernité dans le champ pédagogique. Ils ont ainsi participé ainsi à l'élaboration enseignement supérieur hors de l'académisme, des structures d'apprentissages et de compagnonnages.

La réflexion menée dans cette étude tient compte de ces acquis. La notion d'espace est instrumentalisée dans la démarche pédagogique. Elle sert au développement de la capacité à qualifier l'espace en relation avec ses conditions matérielles et sociales. Les termes d'usage, de structure, de confort traduiront cette attente à ce niveau d'étude. La richesse de la spatialité, dans ses dimensions sensorielles ou poétiques, est explorée de manière très limitée. Nous la concentrerons sur la relation stratégique qu'entretiennent *le plan libre et l'enveloppe*. On s'accordera à penser que la mise en œuvre pédagogique de cette relation est susceptible d'éprouver les capacités d'une maitrise de la tridimensionnalité voire de la spatialité.

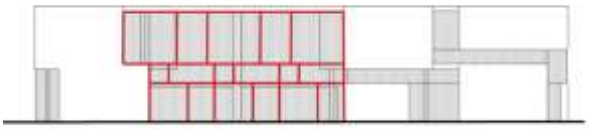


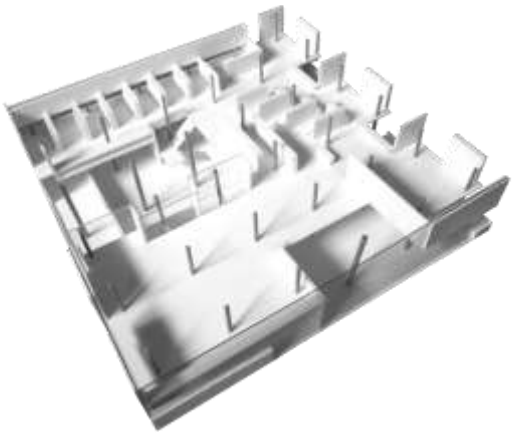
Illustration, la maquette de la figure du plan libre. Parois rouges orientées sud, bleues pour le nord, jaunes pour l'est et l'ouest répartissant les cinq grandes entités programmatiques de la bibliothèque. Escalier lent, en blanc, appartenant au PH1.

[235] Du type poussée d'Archimède.
[236] Pour notre part nous le réservons par exemple au studio suivant, S6 L3 et au cours de Théorie de l'architecture précédant, S4 L2.
[237] Établir ce qu'on enseigne a toujours pour corolaire de reconnaître ce que l'on n'enseigne pas.
[238] Je convoque ici mon expérience d'enseignant élu puis nommé à la Commission culturelle scientifique et technique du Ministère de la Culture et de la Communication, puis du Groupe de travail qui lui succède depuis 1998. Les tentatives d'articulation entre enseignements STA et TPCAU y sont effectivement lisibles dans tous les programmes en application des réformes de 1998 et 2005.
[239] Tous trois architectes et enseignants à l'ENSAPB.

[240] Suisses, Bruno Reichlin ou Lamunière, à Genève et Lausanne ou américaines, John Hejduk à la Cooper Union, Kenneth Frampton, pour ne citer que quelques exemples.

Penser l'espace en architecte. Sur quels supports étudierons-nous la relation entre plan libre et enveloppe ? Les principales variables que nous avons identifiées nous rappellent l'importance de :
- l'incidence de la figure du plan ainsi que sa surface et la position de l'escalier, sur le volume d'air compris entre le plan du sol[241] et le plan libre[242], ou entre le plan du sol et le plan supérieur[243], qui prend part à l'enveloppe de l'édifice.
- l'incidence sur la lumière et les échanges thermiques, selon la répartition entre opacités et ouvertures dans l'enveloppe, latérales et zénithales (façades et PH2) en fonction, d'une part, de leurs orientations solaires et, d'autre part, des besoins programmatiques. Les données analysées pour une vingtaine d'étudiants ; en voici un exemple pour l'étape du 1/100ème :
la liberté par le développement de l'autonomie relative de la structure, arrêts du PH, position du mobilier de stockage et de lecture, et l'usage de trames écossaises[244].





Illustrations : Trois exemples de façade relevant de la trame écossaise. La traduction en profondeur de la trame est visible en maquette : quand elle concerne aussi la structure, l'installation du mobilier…

Enveloppe

Le lieu de la synthèse des échanges intérieur extérieur, visuels, lumineux, thermiques.

De la façade à l'enveloppe. À l'étude des 4 compositions et des cinq points différentes remarques peuvent être faites sur la notion d'enveloppe. Le Corbusier emploie le mot sans se soustraire complètement au vocabulaire académique qu'il cherche pourtant L'attitude est ambigüe au regard de la valeur symbolique et urbaine de cette partie du bâtiment. Durant les années 20, en l'absence d'un système de proportion clairement établie autour des mouvements du corps (Le Modulor) la tentation du tracé régulateur garant d'une harmonie de façade sera forte.

Proportion vide/plein:	Sud: 1/2 Ouest:1/2 Est:1/1 Nord:1/1	
Le linéaire de périphérie du plan libre global: En contact avec l'enveloppe:	140.40 m 63.4 m	
La surface du plan libre: La surface de parois par orientation sud/nord: est/ouest:	612.50m2 124m2 75m2	
La taille (et l'orientation) de l'ouverture du PH2:	5m(est-ouest) x10m(sud-nord)	50m2
Le nombre de places assises pour les adultes et pour le livre:	50 places	

Mais par ailleurs ses dessins comme son attitude[245] tendent à en minorer l'importance[246]. Les expérimentations extra continentales[247] révèleront la nécessité de dissocier l'enveloppe de la peau de l'édifice et Le Corbusier, libéré, déploiera entièrement le propos des *Cinq points pour une architecture nouvelle*. Les exemples de la villa Curutchet (1949, Buenos Aires) ou de la villa Shodan (1955, Ahmedabad) en témoignent. Les brise-soleils vont en particulier permettre de dissocier distinctement le volume virtuel de la villa, de sa limite, entre intérieur et extérieur. La terrasse de la villa Savoie en préfigure les moyens : fenêtre en longueur, tablette, mobilier, structure.

[241] Nous nommons le plan horizontal, niveau zéro : *PH0*
[242] Nous nommons plan libre, le plan horizontal, niveau 1 : *PH1*
[243] Nous nommons le plan horizontal, niveau 2 : *PH2*
[244] On entend par trame écossaise : plusieurs trames aux pas différents et décalés dont la superposition traduit par un rythme aux effets dynamiques. Si les façades de Richard Meier en sont l'exemple didactique (musées comme habitation), celles de Xénakis au couvent de La Tourette en sont l'accomplissement musical.

[245] « La porte d'entrée serait sur le côté; et pas dans l'axe. Serions-nous passibles des foudres de l'académie? » Lettre à Madame Meyer, Le Corbusier, 1925.
[246] … au profit de la coupe et du plan comme représentations et du volume général, « axonométrique » pour ce qui concerne une analyse rapide des dessins.
[247] Asiatiques en Indes, à Chandigarh et Ahmedabad, et Américaines à La Plata (Argentine) et à Harvard, Cambridge (États Unis).

La maitrise de la périphérie de l'édifice ouvrira à la déclinaison en toute indépendance : premièrement de l'insolation par le brise soleil (son épaisseur orienté) et le toit parasol, secondement de l'indépendance structurelle, tantôt intérieure, en limite ou extérieure, troisièmement de la ventilation, par l'altitude et l'orientation des opacités, quatrièmement de l'étanchéité, par la loggia, le mur rideau.

Le mur porteur apparaît une synthèse peu souple des différentes fonctions modernes de l'enveloppe. La crise pétrolière de 1973 et les suivantes inciteront progressivement à la démultiplication de la façade en différentes couches guidées par une répartition économique (et donc le règlementaire) de ces fonctions[248].

L'enveloppe apparaît ainsi le filtre privilégié du monde, cantonné à sa dimension physique (longitude latitude, course solaire, climat) dans cette approche. Ce monde généreux et univoque, statistiquement quantifiable, ne permet pas d'entretenir le besoin du projet en dialectique. En l'occurrence je ne reconnais que l'absence de site, volontaire à cette phase d'apprentissage, a-culturalise le travail projectuel. En revanche, cette absence autorise d'aborder sérieusement les questionnements techniques et leur influence sociale (économiques et réglementaires). Mais surtout, la convergence, entre une pensée non linéaire[249] et des raisonnements reposant sur la maitrise de données complexes, devient un objectif pédagogique majeur et accessible. Nous considérons la capacité de concevoir une enveloppe à la lecture réversible (simultanéité du rapport intérieur/extérieur et extérieur/intérieur), comme objet d'un travail nécessitant une *maturité de second cycle*. Les questions spécifiques relevant de l'apprentissage du projet y sont résolues et celles de sa maîtrise se posent.

Le rapport entre façade et site, pour ne pas se borner à être une réponse pelliculaire et uniquement circonstancielle, passe par une étape d'étude où la question du sens de la présence d'une architecture dans un paysage[250] (qu'il soit urbain, suburbain, rural, ..) sera littéralement posée (semestre 6 du premier cycle, S6 L3). Le changement d'échelle nourrit une conscience non linéaire et non additive du processus de conception. L'exercice étudié ici (30 30) permet de constituer « depuis l'intérieur » une enveloppe comme élément de contrôle des ambiances et de leurs variations, vue (liée à l'usage), lumière (solaire puis intérieure) et thermique, engageant ainsi une échelle de réflexion liée à la taille de l'édifice.

L'exercice ultérieur[251] permet de considérer cette même enveloppe comme le terme focalisé d'un échange entre la vue simultanée, *depuis et sur* le paysage. Cette attitude, entrainant une confrontation entre la baie et la perception d'un paysage, engage des articulations d'échelles allant du meuble au territoire. Dans la progressivité spécifique de l'ENSAPB, un projet de second cycle (ADE équivalent master) permettra alors d'aborder l'enveloppe avec moins de précisions (telles celles qu'apportent l'usage du 30 30oscope) mais plus de synthèse[252]. L'édifice savant projeté vérifiera à l'échelle architecturale le croisement des différentes échelles qui affectent le dessin d'une enveloppe. Sa forme crédible s'illustrera en particulier lors du projet de fin d'études (PFE) et peut constituer un des critères d'évaluation de la maitrise du projet d'édifice.

La posture qui consiste à privilégier à ce moment des études le monologue intérieur/extérieur provoqué par l'absence de site, s'explique par une pédagogie du projet. Sa compatibilité avec d'autres postures pédagogiques contribue à spécifier la nature et les options d'une progressivité des enseignements. Celle-ci garantit une diversification des pratiques pédagogiques afin d'atteindre les objectifs fixés par cycle au niveau national, selon une grille propre à chaque établissement.

À ce niveau d'études (2,5 /5 années du diplôme d'architecte) le *savoir-projeter* recherché met en rapport une discipline (l'architecture dont l'entrée est ici privilégiée par l'espace architectural) et un sujet projetant … au détriment de la dimension urbaine. Le caractère public du programme, une bibliothèque, nous autorise cette impasse. La recherche de caractères d'une urbanité intérieure guide en effet l'articulation entre enveloppe et spatialité (au service de l'usage) par le plan libre. Le rapport de l'édifice au monde est provisoirement déprécié. Le studio du semestre suivant, clôturant le premier cycle est l'occasion de rejoindre un degré de complexité qui n'ignore pas l'altérité urbaine. L'architecture anticipe une relation du corps au territoire et transgresse les échelles.

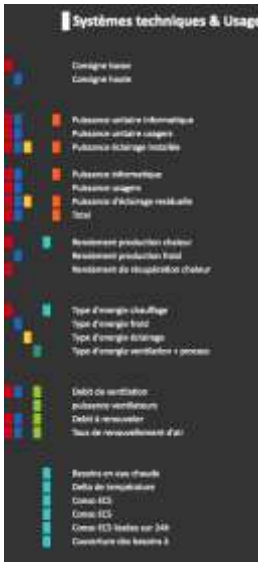
[248] Voir l'article de Jean Marc Weill et le cours donné pour le studio 30 30 sur les différentes « figures contemporaines de l'étanchéité ».
[249] Sur la démarche de projet, Christian Devillers, « lettre à Françoise Choay, sur l'histoire et l'analyse architecturale », Cahier de la Recherche Architecturale, numéro 26, Histoire, p.95-103, 2ème trimestre 1990.
[250] Les éclairages de la géographie, l'histoire, l'approche culturelle et anthropologique manifesteront leur importance.

[251] La réalisation d'une baie dans le studio de 6ème semestre de licence : « 4 fois 1 égalent 5 ».
[252] L'invariabilité du semestre nous oriente systématiquement sur la nature d'un contenu maximum, maximisé, maximaliste … et sa limite.

La performance du 30-30oscope

Bilan et prospective

Le 3030oscope est outil professionnel réalisé par Paul Azzopardi de la société EGIS. Il impose le respect aux étudiants, qui, initialement, sont restés timides à en tester la version Béta. Ces réserves sont compréhensibles au regard d'un travail considéré comme supplémentaire dans un studio très dense en investissement hebdomadaire



Les premières questions relatives à l'intégration de cet outil dans le studio dépendent de son apparente hétérogénéité. L'outil est complexe puisqu'il permet d'associer l'ensemble des facteurs qui influent sur l'énergie réclamée par l'édification tout au long du processus. Les mesures sont classées par catégories.

Elles recouvrent une multitude d'informations dont certaines sont spécifiquement architecturales. Leurs considérations peuvent donc s'opérer lors de l'apprentissage du projet. De nombreux paramètres sont à manipuler pour en expérimenter les effets ou leur absence sur des quantités d'énergie requises, au moment de la mise en œuvre de l'édifice et de la gestion de son fonctionnement, mais aussi d'opérations amont, origine et fabrication des matériaux, comme en aval, recyclage par exemple. La prise en considération de cycles temporels est une des données qui influence l'étudiant dans une démarche où la temporalité de la conception du projet domine son apprentissage scolaire.

Sans évidence de la hiérarchie des paramètres, les étudiants comprennent les nuances entre chacun, mais ne mesurent pas intuitivement leur nécessité. Or il apparaît qu'ils intègrent avec plus de facilité les outils dont ils ressentent le besoin immédiat. Par ailleurs le lien entre un tableur et ses algorithmes cachés et le dessin dont ils osent l'aventure doit être établi pédagogiquement. Cela nécessite des mesures de présentation et d'accompagnement.

Raisons

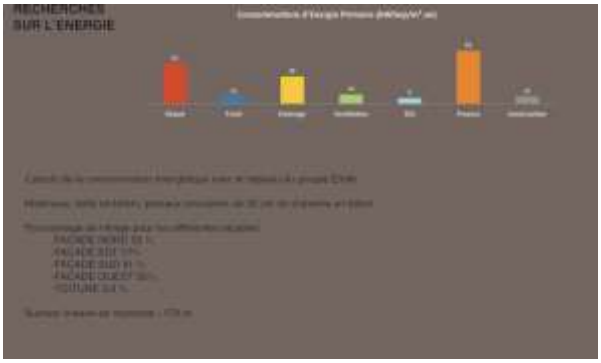
Le studio favorise par réductionnisme un travail extrêmement hiérarchisé : dans les paramètres manipulés (voir exemple de remplissage du tableur) comme dans leur mise en place hiérarchisée (démarche projectuelle). Est systématiquement privilégiée une approche pratique et élémentaire dans une arborescence directe (mais simpliste). Le dessin apparaît comme le vecteur privilégié d'une décision. En introduisant la mesure comme autre élément pour appuyer un choix, une concurrence entre deux objectivités semble se présenter. Un choix projectuel moins simpliste est à considérer par l'étudiant. Le potentiel d'une discipline voisine participe de plein droit à l'élaboration du projet.

Expliquer

Au cours du semestre cinq les étudiants se sentent loin des réalités d'un exercice professionnel qu'on leur présente comme complexe et nécessitant beaucoup de qualités (maturité) lentes à faire émerger puis contrôler. Ils se trouvent en effet au cœur de la discipline enseignée au le plus loin possible, et à égale distance, de leur formation générale et du métier accessible par leur diplôme. Dans cette situation une difficulté à synthétiser même partiellement s'explique mais freine la progression de l'apprentissage du projet.

Pour beaucoup l'enseignement se présente découpé en de nombreuses disciplines[253], souvent vues comme parallèles, ayant chacune une progressivité et un rythme d'apprentissage spécifique. Cela favorise une « digestion lente » où l'on ne peut provoquer fréquemment des situations de synthèses. Le rapport d'études, le portfolio, le carnet préparatoire à la sélection Erasmus, le mémoire (préparant à la démarche autonome de la recherche, en 3 semestres) le PFE, le mémoire professionnel, … sont tous à venir. Le système scolaire est encore très prégnant. L'effort de synthèse est repoussé en fin de cycle ou vers les suivants.

Les concepteurs (Paul Azzopardi / Raphaël Ménard) ont produits un outil remarquable. L'étude fine des 20 résultats permet de confronter outil professionnel et outil pédagogique. La question pédagogique : comment rendre du 30 30oscope entièrement cohérent avec le studio? L'accompagner, par des tests vérifiés, des comparaisons et une démonstration sur un cas existant. Le diffuser au bon moment. Anticiper l'approche de l'enveloppe. L'adapter. Les questions d'ergonomie et de mode d'emploi sont secondaire à celle d'un accompagnement essai/erreur pour faire naitre la conscience d'un choix.



version simplifiée

[253] Probablement le spectre le plus large de l'enseignement supérieur ? Il s'oppose, peut être avec raison, à d'autres enseignements disciplinaires ou techniques, universitaires ou scolaires.

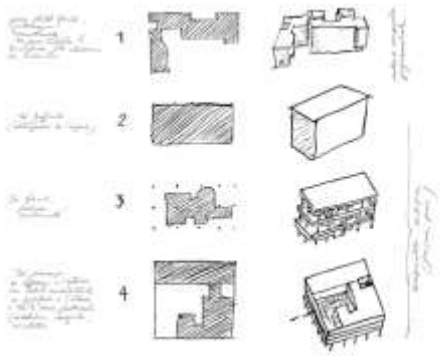
Pédagogie du projet

Sources d'un recul critique

Relation avec l'étude. Le projet d'architecture : Que faut-il enseigner ? Comment faut il l'enseigner ?

Le caractère exemplaire des projets mis en exergue dans l'enseignement permet d'identifier des objectifs compréhensibles et de faire de leur accession l'objet d'un questionnement disciplinaire. Hors d'une période de formation, la réduction a priori des questionnements est illusoire, comme l'est celle de principes stéréotypés pour réponse. L'architecture n'est pas une science exacte et la qualité du projet se partage, en particulier, entre intérêt théorique et pratique inspirée. La théorie architecturale relève elle-même de problématiques difficiles à accorder dès l'énoncé d'une définition par *firmitas, utilitas et venustas*… En quoi le 30- 30 appartient-il ou non à la catégorie « très difficile » énoncée par Le Corbusier dans « Les 4 compositions » ? Lui-même interroge cette partition initiale de ses propres projets par la notion de genre.

« Genre plutôt facile, très difficile, très facile, très généreux ». Genre : en termes d'action, ce qui est généré, engendré. Ni style, ni architecture. Dans les courts énoncés qui accompagnent sa proposition catégorielle, le terme *architecture* apparaît sous une forme adjectivée : « volonté architecturale ». Ce qui souligne une origine très cérébrale. Et qui est préparé par l'apparition de « (satisfaction de l'esprit) » associée à « très difficile ». Ce qui en propose l'accession par la pratique du genre.



4 compositions, Le Corbusier : 1 genre plutôt facile, pittoresque mouvementé on peut toutefois le discipliner par classement et hiérarchie 2 très difficile (satisfaction de l'esprit) 3 très facile, pratique, combinable 4 très généreux on affirme à l'extérieur une volonté architecturale on satisfait à l'intérieur à tous les besoins fonctionnels (insolation, contiguïtés, circulati

La mise entre parenthèses manifeste l'éloignement de l'objectif et la rareté de la réussite. J'oserai le terme contemporain de *projet,* que Le Corbusier n'emploie pas. Et son association à une forme d'abstraction. Avec la liberté que représentent les *cinq points pour une architecture nouvelle*, le volume à six faces autonomes apparaît une conquête. Cependant cette extrême liberté s'accompagne de la contrainte de faire naître une machine célibataire autiste ou autoritaire pour son environnement. Réduire le questionnement à deux faces (hachurées) offre une limite/réserve d'écoute et d'assemblage qui d'une extrême prudence et d'une grande difficulté si l'on ne renonce pas aux objectifs accessibles avec l'abondance des moyens architecturaux déclinables par les Cinq points ….

La comparaison des dessins que propose Le Corbusier montre qu'il compte sur la qualité d'une spatialité intérieure en devenir[254], pour compenser la perte de pittoresque, de générosité, dans le respect du prisme pur. Il ne donne aucun indice pour emprunter la voie qu'il ouvre. Par défaut nous pouvons déduire que la division systématique (de niveaux 3, de structure 3&4), l'addition (pyramidale 1 ou par superposition 3), la combinaison (ou même la combinatoire, de 2, Citrohan, 1922, Pessac, 1925) sont à éviter pour réaliser 2. On peut supposer que la figure 2 remédie au défaut de « discipline » de 1, nécessitant classement et hiérarchie et relève d'une composition cubique ; sa très grande régularité en témoigne dans une forme paradoxalement parallélépipédique. Contrairement au cube, les trois dimensions de l'espace, hauteur, longueur, largeur qui figurent ici sont différentes.

En 1930, Le Corbusier publie Précisions. Dans le chapitre consacré au « plan de la maison moderne »[255] il réécrit les 4 composition avec pour seul commentaire : « *auteuil, garches, Tunis, Poissy*[256] ».

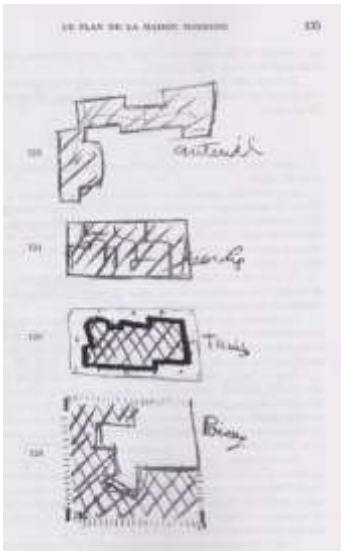


Illustration : 4 compositions, Le Corbusier in Précisions[257]*, 1930.*

Quelles pistes indiquent les autres termes employés dans ce manifeste ? *Insolation* : prédominance du rapport géographique (ou cosmique) au soleil ; *contiguïtés* : fluidité des rapports programmatiques dans une topologie et une territorialité; *circulation* dont on sait à quel point elle est décisive dans le dessin de la villa Savoie (rampe, escaliers, parcours automobile giratoire). C'est l'absence totale de repères et d'échelle qui rend l'investigation ambitieuse. Seul le hors échelle permet la fédération de valeurs énoncées ailleurs.
Ce projet autorise de poser simultanément les questions : Quelle structure, quelle lumière et quel soleil, quelle division et organisation (classement et hiérarchie), Comment échapper à la circulation, au pittoresque, au mouvementé, au facile ? En résumé, quelles sont les qualités présumées par l'intitulé « très difficile » ? Fluidité, abstraction, modernité, calme et ordre, spontanéité (contre combinatoire), classement et hiérarchie, retenu (généreux) et régularité, ne pas renoncer aux besoins fonctionnels (insolation, contiguïtés, circulation) mais en les transcendant : promenade architecturale, jardin intérieur, toit libre (proposition …). Développer la terminologie réelle et déduite…

[254] Espace que Le Corbusier se refuse de formaliser. À cause de sa singularité absolue ? Pour le réserver à des recherches futures? Pour en préserver l'originalité ? Parce qu'il en ignore (encore) la forme ?
[255] In Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme … » ; collection de « l'Esprit Nouveau », Le Corbusier, Les éd. Crès et Cie, 1930, Paris.
[256] Sic.

[257] Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme, Paris 1930, édition originale : Le Corbusier, Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme, Les Editions G. Crès et Cie, coll. « L'Esprit nouveau », 1930, in-8, 268 p.

Ordre des 4 compositions. Les documents sont clairement ordonnés 1, 2, 3, 4 et non simplement distingués (a, b, c, d). Facile, très difficile, très facile, très généreux apparaissant comme les différents chapitre du classement. Le bilan pourrait être chronologique, puisque ce n'est pas par ordre de difficulté. Ce pourrait être l'ordre de l'apparition du questionnement chez l'auteur puisqu'il se réfère explicitement à ses propres projets Intéressant de situer, après cette date, le classement de ses œuvres postérieures. Appartiennent-elles à cette lecture ? Y sont-elles toujours classables ?

Quant à l'identité des exemples, elle se construit au profit d'un travail autocritique de Le Corbusier sur son œuvre, puisqu'il n'y semble pas se référer à d'autres architectures. Trois projets sont évidents, par leur littéralité : Villa Laroche 1923, projet Domino et villa Baizeau, 1928, Villa Savoie, 1929. Le quatrième est ambigu, Villa Stein (ou autres villas blanches puristes, construites ou non, pavillon de l'esprit nouveau EN, 1925, Meyer, 1925, Cook, 1927). C'est donc un terme générique « villas cubistes[258] » qui donne lieu à de nombreuses expériences probablement insatisfaisantes ou simplement suspendues. Comment ne pas considérer la villa Shodan, pourtant contemporaine de la villa Sarabhai (résonnants aux problématiques posées par les villas Jaoul, datant de 1951 également), comme une nouvelle tentative de projet « très difficile ». On notera l'importance de la difficulté en fonction de la dimension de l'édifice 10mx10m (villa Cook), 15mx15m, 20mx20m (villa Savoie), 30mx30m, 40mx40m … Des problématiques homothétiques transgressent les questions d'échelle liées à la géométrie d'un volume à section ou plan carré.

On citera pour ces tentatives extrêmes, le projet de Palais des congrès de Strasbourg, dernier projet de Le Corbusier, ou la médiathèque de Sendai (Japon) de Toyo Ito, dont la lumière est distribuée dans le plan libre au lieu même des faisceaux de poteaux. Le gabarit de l'édifice japonais est de 50m équivalent au projet strasbourgeois. Il est évident que la recherche d'une *spatialité urbaine intérieure* fait partie de l'héritage corbuséen et il reste à comparer les édifices qui le revendiquent.

Illustration : Médiathèque de Sendai (japon), Toyo Ito, 2001, photographie Alain Dervieux.

Soit dans des édifices publics programmatiques qui confinent au gigantisme (plus grand …) soit dans l'exploit technique de la très grande portée (Vignoli à Tokyo) soit dans le rapport au sol et aux services des grands édifices de types tours de bureaux, banques ou centres commerciaux. Le travail des anglo-saxons (Forster, Rogers..), mais aussi de Renzo Piano,.., est à souligner dans ce domaine. Rem Koolhaas est le théoricien de cette *archipellisation* monumentale. Il faut souligner que la compacité exceptionnelle des édifices de Le Corbusier ou d'Ito, où l'éclairement naturel reste une composante essentielle, justifie le qualificatif d'urbanité. La question d'un microcosme qui tend à l'autonomie et aux qualités du macrocosme obsèdera l'architecte jusqu'à la station spatiale.

Ces quatre compositions font écho à une lecture rétrospective de la modernité depuis ses avant-gardes modernes. Quatre périodes de la modernité architecturales se distinguent assez clairement. Une continuité historique assemble ces périodes qui se caractérisent par des cahots et des dynamiques qui secouent les sociétés autant que les individus au cours du XXème siècle.
1 Les avant-gardes modernes :
Élaborations de l'espace, mouvements, expérimentations ; 1920/1940
2 Construire la modernité :
La guerre et la deuxième révolution industrielle comme mobile ; 1940/1960
3 La modernité critique :
Désindustrialisation et radicalisme (retour aux sources) ; 1960/1980
4 La modernité après…
Mondialisation, réactions et réactionnaires des mouvements modernes, 1980/
(Compléter par le texte qui différencie les 4 périodes de la modernité architecturale)

[258] J'ai fait la démonstration graphique de la prégnance de la géométrie de cubes, virtuels et emboités dans le travail de conception des villas Meyer (premier et second rapports de recherche du Bureau de la recherche Architectural, *« L'espace de l'architecture moderne », direction C. Vié et H. Ciriani,* 1989, 164 p., 130 p.)

Influence sur un enseignement contemporain

Problématique

À la moitié du parcours de la formation d'un architecte en cinq ans, dans le cadre d'un studio d'architecture dont la projetation[259] est le déterminant majeur: Quels éléments de convergence peut-on instruire pédagogiquement, dans la démarche de conception se traduisant par le dessin, entre la qualité d'un espace d'usage et la quantité d'énergie nécessaire à sa mise en œuvre ?

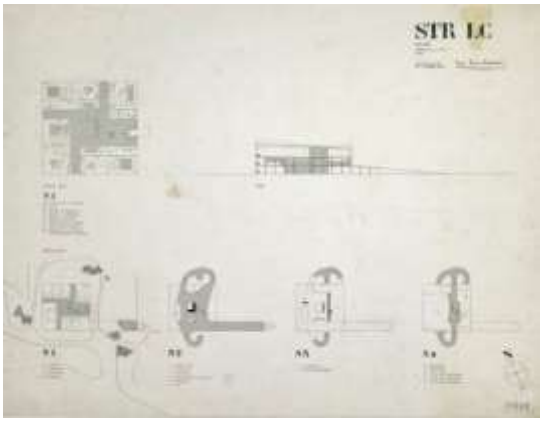


Illustration : Projet du palais des congrès de Strasbourg, Le Corbusier, 1962-64, fondationlecorbusier.fr .

1. Principe

La question de la projetation de l'espace contemporain repose sur la présupposition pédagogique d'un espace ininterrompu entre intérieur intime et extérieur public, du meuble au paysage. Le postulat est qu'il n'y a pas de discontinuité entre la poignée de tiroir et le sommet de la montagne. L'homme les pratique il les relie indépendamment des différences d'échelle par le mouvement de son corps : une chorégraphie individuelle et collective au delà des nécessités fonctionnalistes. Dans ce domaine les travaux de Michel Lussault[260] nous renseignent et nous confortent sur la contemporanéité de notre action.

Dans l'histoire de l'architecture, le paroxysme de la situation est atteint en architecture par le projet de la villa Farnsworth[261] qui ne possède aucune opacité en façade. Ce qui équivaut à décrire une villa d'un seul niveau dont la structure est extériorisée et où l'enveloppe intégralement vitrée du plan du sol à celui du toit est continue sur quatre faces. La limite de l'espace intérieur n'est donc pas la paroi transparente invisible, quasi virtuelle, mais la lisière de la clairière à l'intérieur de laquelle la villa est disposée. L'automne, l'interruption des opacités du plan du sol et celui du toit cadrent les troncs du bois qui bordent la clairière ; le printemps, la stratification de la lisière en prend le relais. Personne ne résisterait à la mise à nu de la mariée[262].

Illustration photographique: Ferdinand Dervieux : Le Grand Verre de Marcel Duchamp, « La mariée mise à nu par ses célibataires, même » ; 1915-1923, Musée de Philadelphie (USA).

L'obscénité de la situation dans la forêt de Plano a conduit Madame Farnsworth à faire poser des rideaux qui lui vaudront un procès de l'architecte, qu'il perdra. Faut il commenter ce résultat ? Considérons que l'éloignement de la forêt rend indistinct aux yeux des animaux l'intimité pourtant éclairée de la villa dévoilée. Il s'agit d'une question d'échelle qui rend évident le déséquilibre des relations intérieures extérieures et leur non réciprocités. En effet « voir et être vu » fondent le rapport de l'homme au paysage et non l'inverse. Organiser le rapport intérieur / extérieur, même en cas de transparence, est l'objet du savoir de l'architecte au bénéfice (d'une considération) de l'être au monde de l'habitant. Qu'elle est la compatibilité ce rapport de visibilité avec un rapport de variation de milieu tels l'humidité ou la température. Sont-ce la biche et l'ours qui font frissonner Mme Farnsworth, l'animalité ou le climat ?

[259] Néologisme formé dans les années 80 à partir du terme progettazione, en italien, qu'on pourrait décrire comme la science du projeter (acte de faire un projet).
[260] Michel Lussault, professeur des Universités en géographie à l'ENS de Lyon, L'avènement du monde : Essai sur l'habitation humaine de la terre, Le Seuil, 2013.
[261] Villa Farnsworth, Plano (état de l'Illinois aux États Unis), 1951, Ludwig Mies van der Rohe. Photographie Alain Dervieux.
[262] Selon l'intitulé duchampien : « La mariée mise à nu par ses célibataires, même », le Grand Verre, 1913-192 3. L'œuvre contemporaine de la villa, « Étant donnés : 1° la chute d'eau 2° le gaz d'éclairage » posthume, donne une version plus bucolique et cruelle voyeuriste et moins littérale de la transparence du Grand Verre.

La théorie de la façade épaisse[263] semble du point de vue de la contradiction du conflit entre protection/transparence, une gestion par la moyenne : la porosité. L'imbrication de l'intérieur dans l'extérieur, et son inverse, ressemble à la très fractale expérience de l'éponge, considérée comme façade. L'invention d'une épaisseur complexe, hiérarchisant par un entre deux les incidences fut utilisé comme rapport d'échelles par Henri Ciriani[264] et épaisseur programmatique par Yves Lion, la bande active[265].

Illustrations : Un dessin d' Yves Lion (la bande active) ; Une photographie du projet d'Henri Ciriani, la cour d'angle, 130 Logements, Saint Denis, 1978/82.

2. L'objectif

L'objet de l'architecture contemporaine est-il de réaliser le printemps éternel et tempéré à l'intérieur d'un réfrigérateur étanche[266] ?

À l'extérieur on ressent le frais sous un arbre, on ne transpire pas à l'ombre d'un mur, on prend le vent dans les espaces ouverts, on se chauffe au soleil d'une terrasse. Et à l'intérieur, dans l'amphithéâtre d'une école climatiquement règlementaire, on risque l'étouffement dans un volume claustrophobe. L'air se fait rare, la peau ne respire plus, la sensation de chaleur contredit la température objective. La dérive est patente. Elle caractérise une régression. Dans un climat variable donné, diurne/nocturne et saisons, l'architecture doit-elle servir à isoler son habitant du monde, le conforter dans un artifice a topique ? Ou doit-elle participer de l'ouverture au monde, offrir la diversité.

Le vocabulaire d'une offre architecturale climatiquement différenciée ne manque pas. Il s'est appauvri parce que le confort mécanique remplace les autres, que les recherches typologiques se sont taries dans la direction de la variabilité. La définition du logement se réduit à une équation économique autour d'un m² sans qualité qui empêche toute fiction.

Comment concilier le confort du citoyen urbain tolérant[267] et d'un impératif politique.
La paresse conceptuelle se traduit par une soumission à la fatalité du mécanique.
La neutralité d'un volume régulier, orienté sur les points cardinaux permet la compréhension des phénomènes lumineux et caloriques. Au détriment du rapport visuel, extrapolé par Mies van der Rohe, l'exercice d'une projetation sans site écarte délibérément la recherche d'un équilibre dans l'échange visuel intérieur/extérieur. On favorisera la nécessité de regard depuis l'activité

[263] Sous la direction de Michel Rémon; *La Façade épaisse - Mise en évidence et expérimentation d'un thème architectural*, Éditions du Plan Construction, Paris, 1980, 106 p.
[264] 130 logements, La cour d'angle, Saint Denis (93), 1978-82, Henri Ciriani, architecte.
[265] Yves Lion, 1987, « Domus demain, la bande active » L'Architecture d'aujourd'hui »n°252, septembre, p.16-20, avec François Leclercq et la collaboration d'Olivier Chaslin.

[266] « En faisant de la nuit le jour, de l'hiver un printemps, l'espace contemporain flotte aujourd'hui hors des rythmes astronomiques. Il stagne sur un midi de mai, dans une interminable pause du mouvement de rotation de la terre ». Philippe Rahm, Architecture météorologique, Archibooks, Paris, avril 2009, p. 59. Il souligne ainsi que cet immobilisme spatial est un immobilisme temporel, une recherche de l'éternité … quelle gageure immodeste ou qu'elle impudence que de s'opposer au mouvement universel et donc à l'un des postulats de l'architecture : la gravité ! Paradoxalement : si le mouvement s'arrête, tout tombe (et entre en mouvement). La recherche d'une architecture d'apesanteur est par contre d'actualité. Les figures de l'étanchéité, chère à Jean Marc Weil s'y radicalisent. Leurs références s'étendent plus facilement des travaux du mouvement De Stijl (Frederick Kiesler à partir de City of space, 1925) aux informations déduites par Camille Flammarion, La Pluralité des mondes habités : étude où l'on expose les conditions d'habitabilité des terres célestes discutées au point de vue de l'astronomie, de la physiologie et de la philosophie naturelle, édition Didier, Paris, 1877).
[267] Et non plus seulement occidental.

programmatique spatialisée. Le profit pédagogique se portera sur l'étude des variables qui influent sur l'échange de données entre extérieur et intérieur.
L'objectif est d'associer les outils pédagogiques expérimentés aux outils d'une réflexion En l'occurrence, le plan libre est ici considéré comme élément garantissant l'unité, la cohérence et la qualité spatiale relative aux usages déduits du programme, associé aux échanges lumineux, thermiques et visuels (dans cet ordre).

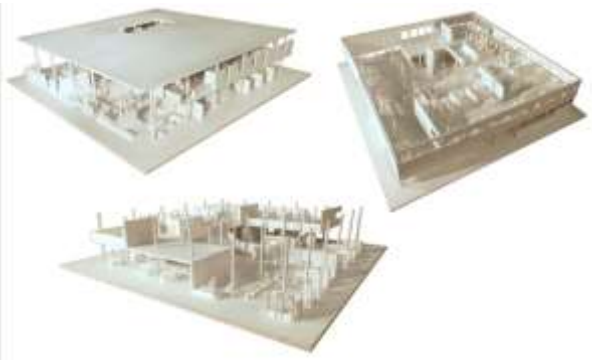


Illustration rapport du PH1, semblant définir le 30 30, avec le volume enveloppe qui le précède pourtant.

La dimension quantitative ne peut être dissociée de la dimension qualitative dans l'apprentissage du projet. Un enseignement par étape progressive permet de hiérarchiser une pensée projectuelle. Ici le propos est de démontrer que le dessin articule physiquement ces outils apparemment distincts. Le calcul, par la mise en place d'algorithmes qui font intervenir une relativité chiffrée, est considéré comme un moyen d'approche et de vérification d'une pensée qui cherche à réduire le doute par l'approximation. Le travail de l'architecte n'est pas dans la substitution au travail de l'ingénieur mais dans sa compréhension. Ceci afin de provoquer des dialogues orientés. L'architecte ne s'en remet pas aveuglement au savoir de l'ingénieur par incompétence. L'ingénieur ne choisit pas à la place de l'architecte. Il n'y a pas un rapport de question/réponse dans l'absolu, simplement parce qu'il y a projet, donc création. La hiérarchie ne signifie pas l'asservissement d'une discipline à l'autre, d'une décision à l'autre, d'une inféodation infériorité/supériorité.

3. Articulation des différents arguments de la démonstration

Incidence de l'hypothèse et de l'usage sur les qualités thermiques

La prise en considération de l'hypothèse et de l'usage dans le raisonnement projectuel

Le travail de la recherche du plan libre n'obéit pas à des règles de composition. L'introduction d'une hypothèse comme source de travail qu'on interroge avant de prendre une décision, apporte une dimension imprévisible (donc originale) mais rationnellement traitée. La rationalité en question, rend visible dans une arborescence de situations, le choix conscient de celle, plus élémentaire[268], qui convient le mieux à l'énoncé posé. C'est l'usage, comme capacité de comportements citoyens conformes à l'intérêt public (le programme, une bibliothèque, est celui d'un équipement public) qui fixe les critères acceptables pour mesurer l'efficacité du projet sur l'espace. L'hypothèse est un repère de sens : elle ordonne le projet dans un sens, elle donne du sens à l'architecture qui y (en) répond. Cependant la dimension programmatique bien qu'essentielle reste sommairement traitée et volontairement limitée pour une approche raisonnée.

La programmation renvoie principalement à l'expérience spatiale de l'étudiant et aucun programmiste ne vient proposer, à cette étape des études d'architecture, l'apport d'une complexité détaillée qui influeraient, jusqu'à la contradiction, la constitution des espaces. Un organigramme hiérarchisé permet d'identifier les articulations programmatiques. Cela constitue, par conséquent, une base qui s'essouffle vite, pour permettre d'affuter une réponse spatiale qui va au delà d'une juste[269] disposition en rapport au hall et sur l'un des deux niveaux. La connaissance du monde du travail permet d'identifier les différentes postures, besoin en lumière spécifique, aération d'espaces distingués sous le nom d'atelier, manutention, …

L'expérience de lecteur (loisir et travail, seul ou en groupe) est également basique chez l'étudiant et lui sert de

[268] Faire le plus avec le moins. La citation « Les is more » de Ludwig Mies van der Rohe, lue, ici sous l'angle d'une économie générale : de l'effort, de la matière.

[269] Cette étape n'est pas à négliger. Nous la considérons comme stratégique à un moment du déroulement du processus. Quant les perspectives, jusqu'alors séquencées selon un parcours logique et simple : Identifier le seuil, entrer, atteindre la banque d'accueil, s'orienter vers le hall et les deux principaux secteurs (adultes et enfants), épuisent leur capacité à distinguer la hiérarchie des parcours à emprunter depuis le hall et de la division verticale des parcours (dont l'accès à l'étage par l'escalier), une maquette synthétique s'impose. Au 1/200ème le plan de partition, dessus / dessous (le plan libre) apparaît pour la première fois comme une figure élémentaire complète en rapport avec le cadre de 30 mètres par 30 mètres. La projetation repose sur une capacité de distanciation pour opérer le recul critique nécessaire à l'auto-évaluation de la démarche.

référence. Les références ergonomiques des gestes spécifiques (s'asseoir, choisir et prendre un livre, lire, se tenir devant un écran, tenir une main courante, se mouvoir entre des rayonnages, monter-descendre un escalier), des rapports entre personnes (devant une banque d'accueil, de prêt, vitesse et politesse des déplacements), des attitudes (chercher au loin avec les yeux les signes d'une direction), donnent de l'épaisseur à l'interprétation d'un programme et une matière à spatialiser. La mesure, la transparence[270], le mouvement direct ou induit, la différenciation entre le parcours du regard et celui du corps caractérisent et nourrissent cette recherche de spatialité. Ils aident à définir un travail de l'espace architectural, disponible à une écoute de la société contemporaine. La liberté de l'architecte résonne ainsi de manière cohérente avec la société démocratique qu'il dessine et qui le dessine.

L'espace du travail s'appuie sur des caractéristiques démarquées puisque l'étudiant en est moins familier. La permanence des positions, la prise en compte de la gestuelle distincte en bureautique et de la manutention, le travail en public, alimentent la réflexion sur la traduction de l'usage dans le dessin des meubles, des emplacements et plus généralement du plan comme continuité.

Le tracé du plan libre au sens propre, comporte une dimension aléatoire ou une dose d'inachèvement qui permet de le confronter à d'autres exigences. L'arborescence des possibles, d'un strict point de vue qualitatif, accepte des interactions paramétrées qui aident à opter. La notion attendue de projet n'est pas celle d'une exclusivité ou d'un caprice mais d'une construction qui s'affirme et résonne aux sollicitations du monde. Le projet, ni le projeteur, n'ont intérêt à la défense, à l'autisme et à l'immanence. La dimension critique du projet, dans le sens d'une capacité *toujours* renouvelée à accepter des exigences a besoin d'une réserve innombrable de possibles. L'ouverture garantit la faisabilité du projet dans toutes ses dimensions, sociales, économiques, … Cette capacité à *rendre possible*, à toute étape du projet, relève de la compétence projectuelle de l'architecte.

Comment la qualité thermique intervient-elle comme notion projectuelle en architecture ?

Le questionnement sur le rapport entre édifice et architecture peut initialement être neutre : quel contrôle peut on opérer sur les « dépenses en énergie » pour réaliser telle ambiance ? Cela oblige l'étudiant à identifier, manipuler et articuler les paramètres en jeu pour en saisir l'incidence sur le dessin du projet. C'est une étape majeure de l'apprentissage, dans ce domaine ou d'en autres.
Certains paramètres sont techniques :

- unité de passage, comportement des matériaux au feu, surcharges,

D'autres sont géométriques :

- proportions, nombre d'or, modulor, rythme des composantes physiques,

Ou d'usage et de convenance, sociales :

- règle de Blondel, travail, étude, un ou deux escaliers, deux ou trois unités, fluidité des déplacements corporels, incorporation aux mobiliers (stock actif ou passif, surface de travail, assise),

Scientifiques :

- dimensionnement, capacité, résistance de matériaux différents en situations particulières (report de charge, trame, porte à faux, suspension, torsion, flambement), …

La complexité projectuelle est en partie relative à l'échelle traitée. Pour simplifier on peut à la fois traiter d'un petit ou grand édifice, petit ou grand équipement, un habitat, un groupement, un ensemble, mais aussi de l'échelle dessinée à laquelle on va conclure l'étude : 1/500ème ; 1/200ème, 1/100ème, 1/50ème, … 1/1, 2/1… La complexité est également repérable aux paramètres qu'on choisit de traiter, à l'approfondissement consacré au paramètre, au nombre de paramètres. Elle vient ensuite de l'articulation des paramètres et leur hiérarchie au profit de la complétude du projet, et de l'idée qu'on s'autorise à en avoir dans le cadre de 5 ans d'études d'une discipline dans l'enseignement supérieur public, contemporain, français.

Le choix d'un enseignement réductionniste ne s'oppose pas à celui de la complexité et de l'hétérogénéité, mais tient à en mesurer les limites. C'est à dire que les limites sont différentes selon les paramètres. Ce qui signifie aussi que selon les enseignements (donc les semestres) les incursions en direction des limites peuvent être différentes, voire ordonnées. La progression[271] est alors l'enjeu du positionnement des différents projets semestriels entre eux[272]proposés aux étudiants.

[270] Au delà de la distinction d'une transparence littérale et d'une transparence phénoménale dont l'avènement à la période des avant-gardes est décrit par Robert Slutzky et Colin Rowe (Article de 1963, in Perspecta , vol.8, ed. Yale school of architecture, pp.45-54 : Transparency : literal and phenomenal, devenue « Transparence réelle et virtuelle » dans la traduction française des éditions du Demi-cercle en 1992 à Paris.

[271] Idéalement les intensifs, workshops, semestres d'été pourraient habilement compléter ce dispositif au profit de l'hétérogénéité des élèves et de leurs parcours.

[272] Soient six sur un cycle de 3 ans, y compris la découverte de la discipline, spécifiée par sa fabrica.

Formuler une hypothèse pour se fixer une ligne de conduite, à la fois personnelle et rigoureuse, gagne à se déduire d'une critique de symptômes contemporains. Nous tiendrons compte du décalage entre : le temps de formation universitaire (cinq ans, ADE + Erasmus), universitaire et professionnelle (un an, Hmonp) puis professionnelle et universitaire (deux ans, DSA, trois ans, doctorat), professionnelle (trois à cinq ans, pour le suivi d'un projet de a à z) et enfin de l'exercice en nom propre, pour reconnaître au travail pédagogique la nécessité d'être prospectif. L'école ne répond pas aux conditions contemporaines d'exercice, mais prépare, par anticipation si possible, celle du futur de la profession. Tenant compte que la machination[273] industrielle et règlementaire gagne souvent en complexité avec le temps, une hypothèse disciplinaire (pérenne par essence) est gage de sérénité et d'autonomie pour l'architecte.

Comment le projet peut-il rendre compatible qualités thermiques et unité architecturale ?

Par éthique pédagogique nous formulons la nécessité d'une acceptation de la diversité qui nourrit la richesse de nos rapports au monde : Diversité des usages, des personnes, des pratiques de fabrication, des économies, des milieux et par conséquent des climats. La recherche d'une architecture microclimatique n'est pas nouvelle. Elle résout pourtant la rupture des climats intérieur/extérieur, issue d'une application radicale et simpliste d'un désir (mais est il exprimé, même par défaut ?) d'un dedans toujours constant et protégé d'un dehors toujours variable et agressif. Le zoning, la séparation des fonctions ont déjà été commentés[274] quant à leur conséquence sur des architectures monofonctionnelles, cités dortoirs et zones d'activité habitables en alternance. L'architecture peut elle rendre compatible, mitoyenne, réversible des ambiances différentes ? Les expérimentations modernes ont déployés le sujet de l'obsolescence architecturale dans plusieurs registres : c'est celui de la matière dans les bâtiments d'habitation construits pour une durée de vie limitée de Jean Dubuisson[275], celui de la temporalité par l'interchangeabilité des programmes dans l'espace avec l'exemple du musée et maison de la culture original du Havre, de Guy Lagneau, Michel Weill, Jean Dimitrijevik, Raymond Audigier, dont est issu la flexibilité du plateau libre de Beaubourg de Piano et Rodgers. Henri Ciriani l'a théorisée [276] par une partition au moment de la projetation entre ce qui est d'ordre pérenne et ce qui relève d'une obsolescence programmée. Ces dualités : servant servi, pérenne obsolète ou typique atypique, révèle une pensée binaire[277], d'opposition entre termes et relève d'une pensée du choix projectuel comme action.

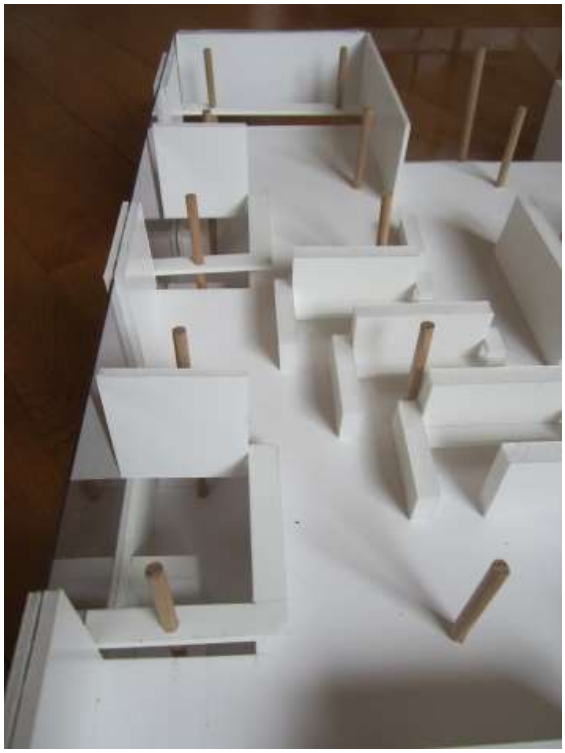


Illustration Variante d'un rapport du plan à l »enveloppe par la coupe aux incidences à mesurer par le 3030oscope

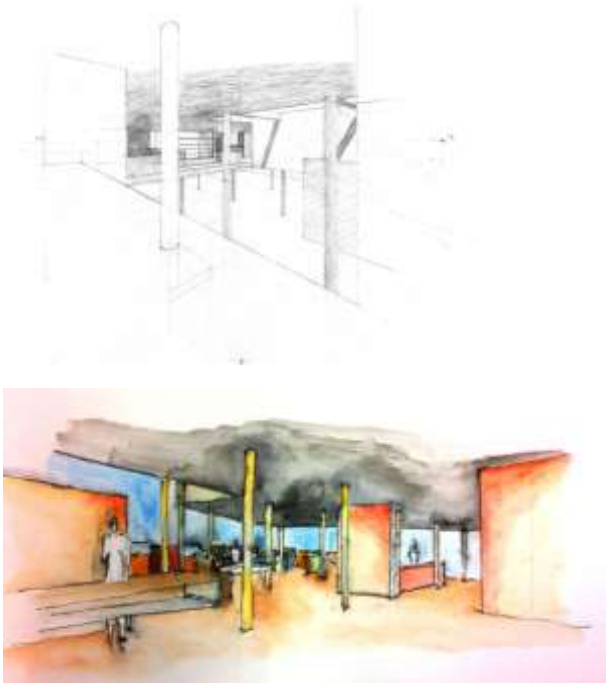
Si le PL[278] touche la façade, la communication des programmes se fait du côté de son bord, libéré en fonction de son traitement. La signification de cette relation change selon qu'une allège transparente ou opaque, basse ou haute, occupe le bord. Si c'est un meuble, la différence de perception, du haut vers le bas ou du bas vers le haut, est renforcée. Les cas possibles sont multiples. Les effets sur la circulation de lumière sont également différenciés par niveau. Cette étude se prolonge par une réécriture du plan. Nous pouvons en apercevoir la complexité à partir de l'exemple ci-contre.

[273] Et non seulement la machinerie industrielel
[274] Références de Raphaël ???
[275] Jean Dubuisson citation sur la durée limitée de vie d'un ensemble de logements, due au procédée constructif employé ?
[276] Obsolescence et pérennité de l'architecture moderne, article d'Henri Ciriani. ???

[277] Elle s'applique bien entendu dans le domaine numérique ou la numérotation 0, 1, ouvert fermé, oui/non, conditionne des modes de calculs d'une très grande complexité. On l'opposera à des systèmes évoqués par l'anthropologue Maurice Godelier dans l'histoire des numérations. 1/un (moi), 2 (moi et toi), beaucoup (indifférencié). Trois est l'origine du multiple, de l'indénombrable.
[278] Dans la terminologie du studio, le plan libre est nommé plan horizontal n°1 (*PH1* ou PL), il est l'objet principal de l'étude. Le plan du sol est le plan horizontal n°0 (*PH0*). Ce plan est une donnée initiale. Il est continu, infini et neutre. Puisqu'il n'y a pas de site, il n'a pas d'identité sauf au lieu de sa superposition par le *PH1*, selon sa découpe. L'espace y est qualifié par la présence du *PH1*. Le plan supérieur est le plan horizontal n°2 (*PH2*). Il n'est pas conçurent du PHL, il se contente de le conforter en laissant la quantité de lumière zénithale nécessaire éclairer les plans inférieurs.

Illustration L'ncidence solaire est compréhensible avant la présence de l'enveloppe qui contribuera à filtrer et distribuer

La possibilité d'usage du sol change selon que les activités sont : en retrait du PL, à l'aplomb du plan ou en débord du plan. Les rapports qui en résultent provoquent des situations qui enrichissent le rapport de l'architecture à ses destinataires. Faut-il montrer la réparation de la couverture du livre à l'enfant qui l'aurait abimé ? Sous quelle topologie, quelle forme, quelle circonstance ?



L'acceptation de la condition climatique par microclimats

Les qualités d'un microclimat extérieur, la zone humide où la brume apparaît, l'arbre sous lequel la fraicheur du couchant est la plus douce, le mur derrière lequel l'ombre est plus drue, l'angle du chemin à partir duquel le souffle du vent est frontal, le dénivelé où l'on vient s'asseoir le matin pour voir la vue sans contrejour. Là où le premier verglas apparaît avec l'hiver, l'arbre qui ne retient pas la pluie chaude des orages d'aout, l'obstacle qui barre la continuité des jeux au soleil, le pont qui décoiffe au dessus du torrent en sont les pendants désagréables. L'art du projet d'architecture et de paysage en relève le défi.

À quelles situations ces cas correspondent-ils en intérieur ? Quel intérêt y-a-t-il à produire des variations microclimatiques ? Quels sont les nouveaux paramètres qui influent sur le couple, central en pédagogie, le rapport d'économie entre qualité/quantité ?

La condition en est la maitrise des mouvements de l'air. L'air chaud, agité de turbulences, est soumis aux effets de convection. Par similitude le comportement de l'eau, gravitaire dans son état liquide, du ruissellement à la flaque, pourrait être domestiquée. La limitation de l'entrée d'eau, sans l'interdire, serait une mesure pragmatique à ré-apprécier architecturalement.

Sans aller jusqu'à la question d'accueillir la neige dans un bâtiment, faire un bâtiment accueillant pour la neige montre la dimension programmatique et simultanément poétique d'un élément. La dimension poétique de la neige, par exemple, est essentielle et ne relève pas simplement de sa convocation dans la maitrise de l'art de construire. Doit-elle en devenir l'axe principal de motivation du projet ? Pas plus qu'un autre il me semble, mais pas moins. On peut convenir qu'il soit légitime, pour répondre à un besoin d'équipement touristique, d'édifier en haute montagne. Et par conséquent tenir compte de la modification de la lumière et de la perception du paysage qui contrastent fortement avec l'été. Mais comment convoquer cet axe en compatibilité avec d'autres ?

Dans notre cas, le plan libre, qui s'appuie sur une fluidité tant horizontale que verticale permet de nuancer en permanence, de manière subtile à brutale, la prédominance de qualités d'un espace en perpétuelle variation (mouvements). Il facilite la possibilité de l'alternance de ces qualités. Il rend extrêmement difficile d'en contrôler toutes les articulations. Il est évident, qu'enfermé dans le Tupperware de l'amphithéâtre central, dans mon amphi printanier, j'ai besoin d'air parce que je parle loin, fort et longtemps, je me déplace et me meut pour conserver l'attention sur mon propos et les documents projetés, je me concentre, pour exercer une continuité de sens compréhensible. Pour tout cela il faut de l'oxygène, dans mes poumons comme sur ma peau. Or dans ce même amphithéâtre les élèves sont immobiles,

réceptifs devant leur feuille de notes ou écran. L'écart entre activité et passivité programme différemment cet amphi à l'espace unique et partagé. La condition climatique l'a rendu étanche, sans fuite et donc sans « courant d'air ». Par chance le courant d'air persiste dans le plan libre. Mais son indiscipline reste à programmer …

Les éléments, en tant que manifestations naturelles, participent de l'impression de confort. En particulier parce qu'ils se rappellent à nous, même désagréablement, par variation des ressentis. L'architecture sophistiquée est au contraire celle de l'éternel printemps ou celle qui accueille, simultanément toutes les saisons aux endroits souhaités ? L'hypothèse du caractère défensif s'oppose à l'hypothèse de la diversité des caractères. Pour l'arbre la mousse sur son tronc signe l'orientation nord. Que signe-t-elle sur le mur de la maison ? Comment rend-on un mur moussu ? Le travail de l'artiste Michel Blazy[279] illustre la capacité de tolérance à la décomposition, la mutation, à l'acceptation des cycles vitaux. Tout comme Marcel Duchamp le préconisait, il utilise des cycles énergétiques mineurs, à peine provoqué pour qu'un univers (microscopique) s'avère, se développe et se meurt. Duchamp[280] renvoyait aux énergies vitales : la production de larmes (le pleur), de sueur (la transpiration) et toutes les humeurs imaginables dont on ne fait rien et qui se perdent malgré leurs manifestations visibles (donc artistiques) et répétées.

Le rapport entre air et température se traduit par une convection. Ce mouvement entraine une aspiration qui génère des turbulences. Le phénomène s'étudie dans le détail en soufflerie. Il dépend évidemment fortement du plan du secteur concerné. À l'approche des façades, avec une double hauteur étroite, le phénomène est amplifié. L'orientation de la façade est, ouest, sud participe au déclenchement du phénomène en fonction des échanges thermiques et en particulier du rôle du soleil : nombre d'heures d'ensoleillement, variation de son action en intensité en fonction de son inclinaison. Des parois perpendiculaires à la façade aident à conduire l'air et servent à accélérer le mouvement. Au contraire, une simple hauteur minimise la convection verticale et interdit la convection oblique (en direction de la surface du plan supérieur). Du simple tissu médiéval à la périphérie massive et porteuse en passant par le mur rideau, la différenciation entre enveloppe et façade[281] est une longue histoire alternative éclairée par la contribution majeure[282] de Gottfried Semper ou plus récemment encore de Richard Scoffier.

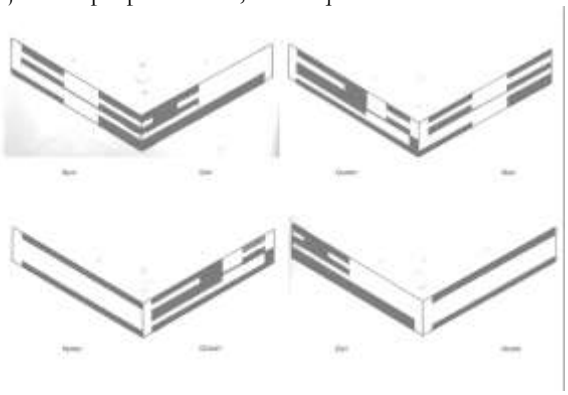
[279] « Projet d'intérieur aux insectes" – "Les fontaines de la bonne volonté"; centre d'art du Crestet (26), 2008, Michel Blazy.
[280] Duchamp du signe, éd. Flammarion, Paris, 1975.
[281] Pavillon de l'arsenal ; Université populaire : « Où va l'architecture » ; (Cours n°2, 11 février 2012). http://www.pavillon-arsenal.com/videosenligne/collection-29-376.php
[282] Du style et de l'architecture, écrits 1834-1869, Marseille, éd. Parenthèses, 2007, Gottfried Semper.

Le changement d'échelle accompagne la traduction dessinée des questions entre enveloppe et thermique

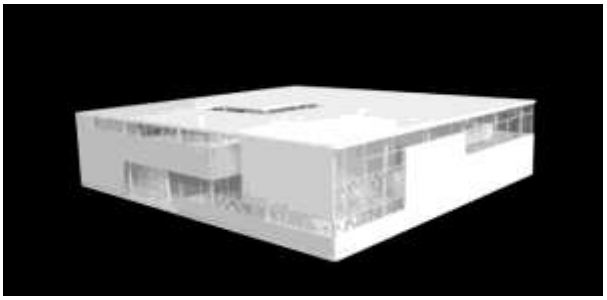
À quel objectif pédagogique concourons-nous ?
Si l'enseignement de l'architecture s'efforce de réduire l'écart entre projet et apparence, le changement d'échelle y tient une place essentielle. Il permet de mesurer cet écart par étapes. Le passage d'une abstraction à une réalité. Cette hypothèse radicale se résumerait à une explication du projet selon laquelle projeter serait la réitération d'une idée essentielle, différemment exprimée jusqu'à l'accomplissement.

Évidemment, l'excellence du projecteur reposerait sur sa capacité d'énonciation initiale. On entend plutôt ici que l'énoncé lui même gagnera autant à se préciser que le dessin qui l'accompagne. Pour illustrer le défi de cette précision nous partirons de l'exemple du passage de l'enveloppe, de l'échelle du 1/100ème à celle du 1/50ème.

L'enveloppe est déterminée par deux facteurs prépondérants qui entrent en conflit au moment de son dessin. Elle se doit de laisser entrer la lumière nécessaire à l'activité sur et sous PH1 nécessaire aux activités situées en profondeur jusqu'à 6 mètres environ (rapport extérieur/intérieur). La taille des ouvertures et l'incidence climatique (soleil, saisonnalité, horaire) sont les paramètres principaux. Ils conditionnent, par la retenue, le filtrage ou la transparence de rayons lumineux, la température « traitée » par cet écran. Inversement depuis l'intérieur, l'enveloppe qualifie le rapport intérieur/extérieur comme filtre de la vue. L'idée principale de l'enveloppe va décider de la partition majeure et proportionnée, de chaque face du volume.



Exemple de 4 façades associées, commentaire sur leur la mise en mouvement destiné à désigner l'entrée depuis une approche quelconque.



Exemple de 5 façades, ouverture du PH2.

Cette partition à l'échelle du 1/100ème se joue autour du tracé d'une ligne à l'effet de césure.
À cette échelle, le débat avec mon complice Jean Marc Weill porte sur la signification de cette ligne. Elle n'est ligne qu'à cette échelle. En effet cette ligne est l'expression d'une simplification : alternativement bord d'opacité ou limite d'ouverture. L'échelle interdit en maquette qu'une complexité interfère simultanément avec les décisions majeures. Une fois la ligne située, elle est d'abord vérifiée dans son efficacité quantitative (mesure des surfaces, puis des volumes, d'air et de matière), arithmétique et géométrique (proportion). Mais sa nature et sa complexité restent à penser et constituent une couche d'interrogation supplémentaire à traiter ultérieurement. Leurs résolutions appellent dessin et maquette à une autre échelle qui suscitera une prise de position. Il est évident qu'une simple ligne ne partage pas le rapport entre une opacité et une ouverture vitrée. Il est même compréhensible que faire disparaître ou déplacer l'une des lignes, représente un effort conceptuel manifeste. Le clair de vitrage nécessite dans la maison Fisher[283] de L.I. Kahn, une capacité de son concepteur à se représenter simultanément l'intérieur et l'extérieur, afin d'offrir une perception différente, et de « plier » la ligne pour la faire participer à la définition d'un volume. Ce volume Kahn en maîtrise tous les aspects. Il connaît le comportement tridimensionnel de toutes les arêtes, jusqu'à l'échelle de la matière mise en œvre. Les éléments de cette complexité sont le mur, qui lui même est décomposable en plusieurs matières articulées, l'huisserie qui cadre, porte étanchéifiée, et le verre qui cadre, fixe ou mobile, la transparence de la lumière et du regard. Cet angle dépasse la simple nécessité d'une fenêtre : elle articule deux faces verticales de la maison et son toit, et assure un usage intérieur qui s'accompagne d'un meuble qui épaissit la fenêtre jusqu'à l'échelle de l'incorporation des habitants. La distanciation critique vis à vis du projet est facilitée quand une même ligne assume une polysémie de l'intention à la réalité.

[283] Louis Kahn, Fisher House, Hatboro, Pennsylvanie, USA, 1967. La baie d'angle de la maison Fisher est étudiée par tous les étudiants de 2ème année de l'ENSAPB dans un exercice de traduction dessinée, d'après l'idée et sous le contrôle de Jean-Marc Weill et son équipe d'enseignants STA : Gérard Pras,

Le changement croissant d'échelles encourage la traduction dessinée des questions entre enveloppe et thermique et dynamise la démarche projectuelle. Transformer la ligne en joint va constituer l'enjeu initial du 1/50ème. Cette échelle permet de percevoir la division de la ligne initiale en trois : deux bords de matière et un interstice. Le moment où ces trois éléments vont devoir être définis en épaisseur, passer de la surface au volume, introduira le prochain changement d'échelle. Chaque échelle est comprise entre deux servitudes. L'une est nécessité par le dépassement de l'échelle précédente, l'autre par la nécessité de son propre dépassement. Chaque échelle est ainsi l'enjeu d'une complétude dynamique. Puisqu'elle est appelée par la précédente, elle induit un re questionnement où le dessin (changeant d'échelle) gagne en propriété. Ces propriétés sont celle transmise par passage de la ligne unique au joint, puis à la matière. En l'occurrence la partition binaire entre carton et vide, signifie le rapport entre opaque et transparent. Le joint, qui apparait entre deux surfaces, engage l'articulation physique de ces surfaces par une huisserie. Enfin les limites matérielles engagent la division d'un matériau transparent ou opaque en différentes parties à assembler, dans le contexte d'une façade légère mais variable en hauteur (3,5m à 7m).

Illustration : Exemple de répartition des ouvertures/opacités au 1/50ème en maquette

Cette capacité de l'échelle atteint ses limites après que ses lignes aient consacré une expression dessinée du sens à cette échelle dans le respect de ce que l'échelle précédente avait défini. En effet, il ne s'agit pas de remettre en cause les acquis de l'échelle précédente mais de les confirmer, de les compléter en cohérence avec elle. Toute échelle s'articule avec la précédente et la suivante. Le dessin de conception est pris comme un *work in progress* qui accompagne la précision d'une pensée s'affirmant en des choix progressifs et conscients. Ce dessin est celui qui confirme, en les précisant, les décisions prises par le dessin préalable, tout en manifestant une incomplétude suffisante pour rendre indispensable un dessin à l'échelle

supérieure. L'alternance de validation et de trouble, convoque-t-il une capacité psychasthénique ? Ou de simple perfectionnisme ? La dynamique d'une satisfaction relative est sollicitée. Elle permet d'autant mieux de comprendre en quoi le trait dans son évolution reste parallèle à la réduction de l'approximation d'énergie qu'il engage.

À chaque échelle, quel est le lieu du dessin qui donne lieu à une incidence thermique ?
L'exemple de l'écart entre les apports dans le processus de conception entre les échelles du 1/100ème vers le 1/50ème montre qu'il engage une vérification à rebours. Il montre aussi, qu'à chaque écart, il existe un type d'apport différent. L'incidence de l'épaisseur progressive du trait et son passage en trois dimensions influence beaucoup le calcul d'énergie engagée. Non seulement en terme quantitatif puisque le comportement de ces épaisseurs n'est pas le même que celui des vitrages potentiels[284]. Mais aussi en termes qualitatifs. La répartition de la transparence en surface, entraine la conscience de différences entre types de façades légères et leurs structures afférentes, et celle de la position respective de différentes épaisseurs : étanchéité à l'eau, air et isolations. Ce sont des décisions qui entrainent le second œuvre et les finitions. Quelle apparence donner aux différentes surfaces de matières données à la vue ? Le chemin vers la matérialité trouve une expression non arbitraire dans la démarche de projet. Le choix de conception est à faire entre des possibilités étayées par des données. Il est susceptible de s'exprimer hors de la démarche de projet. Il quitte le mystère conceptuel pour être appréhendé par les autres acteurs, ingénieurs, maître d'ouvrage.

Au 1/200ème « la maquette couleur » permet au contraire des décisions stratégiques liées à la recherche du plan libre. Les critères à hiérarchiser, retenus pour évaluer la liberté du plan sont réunis en quatre points :

- la capacité de l'escalier à « bien » distribuer les fonctions situées sur le PH1, à partir de sa « juste » position au PH0,
- la *figure du plan* en termes de simplicité/efficacité/identité, sous l'influence de l'hypothèse depuis le choix de l'entrée, du premier arrêt, du contour général.
- la correspondance programmatique avec le plan en rapport à l'orientation solaire, à la lumière, à la proximité, à la mitoyenneté des fonctions,
- l'autonomie, dans l'espace et dans le temps[285], de la périphérie du plan à la limite de trente mètres par trente mètres[286],

Ces critères entrainent des décisions auto-référentes, dans la mesure où elles prennent également part à la définition de la liberté du plan. Cependant, on notera, au niveau méta structurel, qu'elles induisent des relations dynamiques et interactives avec la notion d'énergie. Celle qui nous semble primordiale à cette étape de la conception est liée au rapport : *Figure du plan* / Orientation solaire. Le plan de base est carré et rigoureusement orienté sur les points cardinaux. Ceci afin de rendre conscient du rapport entre cette neutralité modulée et les invariants solaires et climatiques du site.

Une figure résultante caractérise le plan et induit des qualités thermiques (et lumineuses) différenciables

Le rapport tracé/géométrie se traduit directement par une figure caractéristique et synthétique dont on constate l'apparition involontaire dans les projets. Depuis la périphérie un plan d'une profondeur de 30m offre la perception d'un espace trop sombre pour vous inviter à entrer. Seule son interruption, livrera le cœur du projet à la lumière et rendra opératoire la fonction distributive du hall. Le plan de base carrée et son orientation cardinale induisent pour l'interruption une orientation : Nord-Sud ou Est-Ouest. Ce choix présidera au dessin du nouveau contour du plan qu'on appelle ici figure.
Les figures sont en I, en L, en T, en U ou en G, en F, en Z[287], en H … Elles sont déterminées par une, deux ou trois branches. La figure est a priori simple, puisque des arguments de complexité manquent, à cette échelle. Sans atteindre de contradiction, elles seront amenées à évoluer pour convenir plus finement à une question opportune et chiffrée, fonctionnelle, spatiale ou climatique.

L'adéquation entre figure de plan, programme, enveloppe virtuelle, est recherchée au 1/200ème. Le climat influence le processus de projet avant même l'introduction de l'enveloppe. C'est le plan libre, dont le dessin est déterminant durant l'ensemble de la démarche (plan référent à tous les arguments de projetation) qui reçoit le premier les informations venant de l'extérieur. C'est en fonction de sa potentialité que les choix fonctionnels et de répartition programmatique sont faits. Sa *figure* joue donc un rôle stratégique dans l'articulation dessin des contours orientés /influence énergétique. Un premier classement des situations rencontrées est fait et peut donner lieu à calcul à des fins d'identification quantitatives. Exemple linéaire de // en contact ou détachés de chaque face orientée. Ce qui équivaut à identifier la surface d'écart entre plan libre et périphérie du 30 30.

[284] Double, triple vitrage, épaisseurs du verre, … mais aussi transparent, translucide, filtrant, occultant, variant, etc. …
[285] Le gage de liberté du plan est qu'il semble avoir décidé des autres éléments au bénéfice de sa liberté. Il n'est pas « composé », c'est lui qui compose avec l'espace. Il n'entretient donc pas de relation de dépendance mais il est le résultat d'une négociation positive.
[286] Figurée ici par la matière grise (neutre) du *PH0*, avatar du sol.
[287] En baïonnette pour être plus précis.

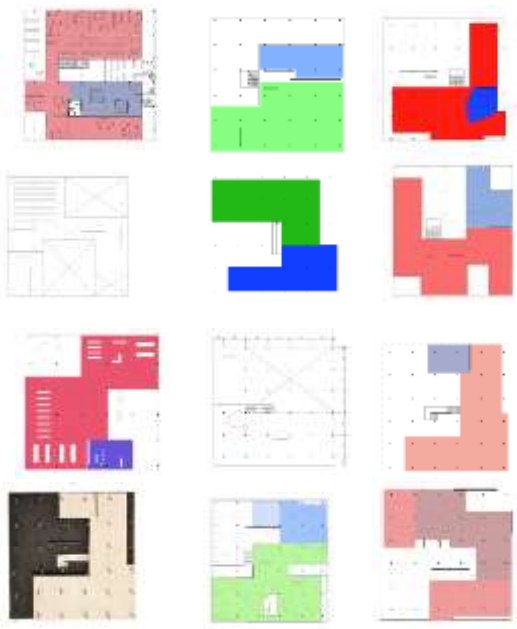


Illustration : Différentes figures du plan libre effectivement produites dans le cadre de l'enseignement du 30 30.

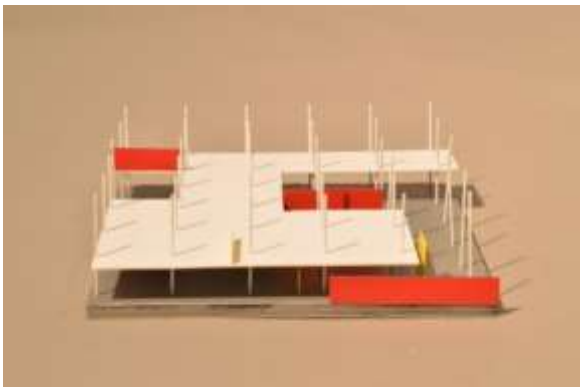
Il est possible de catégoriser les bords du PH1 dans leur rapport majoritaire à l'axe nord /sud ou à l'axe est/ouest. Cette dominante caractérise l'axe du parcours dans le plan. En entrant au sud on propose implicitement de traverser le plan pour rejoindre le nord et d'accomplir ainsi un parcours de reconnaissance. Les limites orthogonales du PH1 vont donc rythmer ce déplacement en l'accompagnant dans une direction parallèle (nord sud) ou le contrariant dans une direction perpendiculaire (est/ouest). Ceci nous permet de comprendre en quoi l'orientation solaire devient la variable décisive, autant qualitativement que quantitativement, des variations d'échange d'énergie venant de l'extérieur[288], qui accompagnent le plan[289]. Ultérieurement l'importance du linéaire de périphérie du plan libre, le périmètre, ramené à leur parallélisme avec les quatre orientations solaires se mesure à son influence sur le delta énergétique d'un mètre linéaire de bord de PH1. 1mlPH1/N, 1mlPH1/S, 1mlPH1/O, 1mlPH1/E.

[288] À travers l'enveloppe constitué de cinq faces : quatre façades et le *PH2*.

[289] Initialement découpé pour les seules raisons d'échanges lumineux.

Conclusion provisoire

Il faut donc donner au 3030oscope le moyen d'accompagner la démarche de relativité quantitative dès le choix de la figure du plan libre. Et non le réserver au calcul a posteriori, constatant fatalement les incidences d'un choix. En conclusion, il faut ajouter un cinquième critère de décision à l'évaluation de la liberté du plan au 1/200ème. La conscience d'établir un choix stratégique gagne en intérêt si il peut ensuite se confronter (se mesurer) aussi à l'orientation, nuancier de facteur thermique. Dans un premier temps il s'agit d'interpréter l'influence de l'orientation solaire comme apport de qualités lumineuses aux éléments du programme ; ceci à partir de la séquence dynamique entrée/hall. C'est un premier facteur du positionnement stratégique. Ensuite la dimension quantitative de la lumière et des échanges thermiques pour les grands ensembles fonctionnels (administration, secteur adulte, secteur enfant, salle polyvalente, secteur numérique, …) alimentent le second positionnement stratégique avec une finesse croissante par étape. La cristallisation progressive de l'enveloppe accompagne en effet la possibilité d'une mesure progressive de son incidence sur les échanges lumineux, thermiques et visuels en question.
La première étape rencontrée, au 1/200ème, est celle de la définition de la figure du plan libre qui rencontre une situation sans enveloppe. C'est à dire que toute la lumière entre en direction de l'espace sous et sur PH1, depuis les quatre faces verticales et la face supérieure horizontale. Sans ces cinq faces : les changes thermiques sont incontrôlés. La maquette, par les parois colorées[290] induit le recourt à des qualités différenciées selon les orientations.



Illustration, maquette couleur

[290] Une paroi bleue est orientée vers le nord, elle est *froide*. Une paroi rouge (au dos d'une bleue) est orientée vers le sud, se *réchauffant* de la lumière, solaire, *verticale, permanente*. Une paroi jaune orientée vers l'est ou l'ouest est baignée le matin ou l'après midi d'une lumière solaire, *horizontale, symétrique*.

Il faut alors pouvoir corréler chaque face avec un potentiel d'éclairement et de température d'ambiance. Méthodologiquement parlant, il faut refermer l'enveloppe jusqu'à un équilibre plausible entre la lumière nécessitée par chaque fonction et les échanges thermiques affectés par la présence d'ouvertures dans les opacités. La découverte de ce potentiel nécessite une connaissance approfondie de la figure architecturale et de sa formalisation au cours du processus projectuel.

La figure dans l'enseignement du projet **architectural**

Contribution à une théorie de la figure architecturale.

Références du terme
À l'origine, le terme figure appartient au champ de la rhétorique. Dans l'enseignement de l'architecture, la **figure**[291] est une notion qui a longtemps été dédiée à l'analyse. Mais initialement la source du terme se trouve en rhétorique : « Il y a une différence entre ce qui peut être imaginé et ce qui peut être pensé. Cette distinction implique qu'une figure représente une idée. (…) Ce concept comprend aussi une distinction entre la figure et le contenu. La figure donne une approximation aussi fidèle que possible d'un contenu qui reste ineffable. (…) L'efficacité des figures réside dans leur pouvoir de synthèse. Ils rassemblent et cristallisent une série d'expériences complexes qui sont diffuses et imperceptibles. La figure est donc une condensation dont l'effet immédiat est de suggérer la richesse et la complexité de la réalité. »[292]

Le choix de décrire un édifice, en tant qu'unité, sans en évoquer l'apparence, la ressemblance, le style, au travers d'un terme qui le définisse de manière unique est nécessaire pour l'évoquer en son absence. La figure transcende alors la notion de type, essentiellement dédiée au mode d'organisation.

La figure permet a posteriori de porter sur l'architecture un regard critique synthétique. C'est un élément de vocabulaire qui rend compte d'un édifice, sa présence, son essence. Citation : … De manière plus originale, ce terme est volontairement employé depuis sa fondation[293] par le groupe UNO[294] à des fins pédagogiques, comme un des éléments sur lequel repose l'explicitation d'un enseignement progressif du projet. Il est couramment utilisé à partir de cette période dans les textes de recherches[295].

Dans l'ouvrage consacré à sa pédagogie (« Catalogue UNO », 1980, page 27), l'auteur écrit à propos d'un studio d'architecture de fin d'études : « La pièce urbaine »:
« L'approche du projet se fait par l'élaboration de figures dont les limites se différencient d'une représentation de la matière dont seront faits les édifices. Le travail s'effectue à petite échelle, en maquette, pour éviter que l'étudiant identifie chaque élément de la maquette à un bâtiment. La figure … doit répondre à 4 conditions qui, suivant les hypothèses de chaque étudiant, satisfont à des spécifications différenciées :
Site ; Extérieur reconnaissable ; Intérieur identifiable ; Libérer par extrapolation de densité ».
Dans ce texte sont posés : le caractère abstrait de la figure et celui de sa capacité d'anticipation, l'instrumentation de la réduction de l'échelle et de ce qui est représentable, l'unité articulée de la figure en dépit de sa composition par parties.
Pour compléter le savoir rassemblé depuis la période d'expérimentation de la figure, un extrait d'Interfolio, n°2, en 1994, où j'écrivais[296] : *« Le travail sur la figure relève de la contextualisation des données et des intentions. »* Formaliser une idée, parce qu'elle opère dans un contexte polysémique traduit par une physique anthropique (donc tangible et perceptible), permet d'opérer une synthèse instantanée dans une phase initiale du projet. Le recul critique au projet en est favorisée par l'échelle et le vocabulaire formel, au moment où seuls les éléments principaux offrent une hiérarchie lisible. La figure sert ainsi une phase stratégique de mise en place des choix fondamentaux en matières d'identité, d'identification, et d'articulation : programme/architecture/milieux. La figure est donc principalement un élément d'arbitrage de la dialectique intérieur-extérieur. Le choix topologique élémentaire de la répartition d'un programme complexe obéit avant tout à une rationalité fonctionnelle. En échange, le sens que ce même programme peut prendre au regard de son contexte se traduit par une affirmation de visibilité apparemment indépendante de la fonctionnalité. La figure, comme outil de synthèse, s'impose entre idéalité formelle et fonctionnelle d'un programme dans son contexte.

L'outil pédagogique

[291] En psychologie : tendance d'une forme réceptive à se détacher du fond et à se constituer en structure autonome. Linguistique : modification de l'emploi des mots. Géométrie : dessin servant à la représentation d'êtres mathématiques. Verbes : se figurer, configurer. Expressions : prendre figure ; en arts : la figuration en peinture.
[292] Alan Colquhoun, « Forme et figure », Oppositions 12, printemps 1978, pp. 26-37.
[293] Pendant le séminaire enseignant d'UP8 en 1978.
[294] Dont les fondateurs en 1978 sont les architectes : Henri Ciriani, Jean-Patrick Fortin, Édith Girard, Claude Vié, rejoints d'abord par Laurent Salomon et Alain Dervieux, ...

[295] Plusieurs exemples : Enseigner le projet d'architecture ; actes du séminaire de Bordeaux, 1 & 2 avril 1993 ; Figures de la conception architecturale : manuel de figuration graphique/ Philippe Boudon, Frédéric Pousin. - Paris : Dunod, 1988.-112 p. ; « La figure architecture, un enjeu esthétique » Patrick Berger, Christian Eychenne, Collège International de Philosophie, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1988.
[296] « Point projectuel et foyer spatial » ; Alain Dervieux, Interfolio, n°2, 1994.

L'expression de la contradiction explicitée ici nécessite la manipulation dans l'espace d'éléments incomplets mais précis. La continuité, la contiguïté, la proximité, la position topologique (en haut, en bas, dessous, dessus, devant, derrière, à gauche, à droite, posé, soulevé), la proportion, la relation d'échelle, l'orientation (solaire ou géographique), la quantité relative, la manifestation synthétique, qualifient cette précision. La nature tridimensionnelle de l'espace reste à cette étape du domaine de l'incomplétude: épaisseur, division, répétition, stratification, périphérie, distribution, sont en attente de qualification. Installer des surfaces, par définition bidimensionnelles, dans une situation tridimensionnelle, par tension et pliage, permet de gérer la simultanéité du binôme incomplétude/précision.

La figure a par conséquent une valeur limitée dans un processus pédagogique. Sa pertinence se résume à la résolution d'un conflit entre l'attente publique (compléter une situation partagée) et la dimension singulière d'un édifice (satisfaire un programme et ses usagers). Son efficacité s'estime à une échelle très grossière. Pour l'étudiant, son avantage est de pouvoir être réalisée très facilement par pliage ou collage d'éléments réguliers simples, des carrés, à moins qu'une dimension l'emporte sur l'autre, ce qui impose le rectangle. Aucune possibilité d'enclore l'espace n'est possible puisque l'on choisit deux des trois dimensions à représenter et une de ses deux dimensions (au plus) à privilégier. Une forte hiérarchie s'installe entre les trois direction de l'espace : l'importante, la secondaire et celle qui reste à définir spatialement : une intériorité en devenir. La maquette qui en résulte est facile à faire et presque autant à (in)valider. Les défauts des décisions figurées, comme dialogue avec le programme et avec le site, apparaissent très vite. Et la balance entre elles s'établit sur l'évidence ou la difficulté d'une hiérarchie qui ressort de sa lecture. Suspendre la question de la nature spatiale de l'épaisseur oblige de la figurer autrement, en perspective notamment[297]. La démarche d'enseignement s'appuie sur la capacité de certains outils de représentation à accéder à des questionnements projectuels et d'en révéler leur limite. La dynamique du projet nait de l'usage gourmand d'un instrument conduisant à l'inaccomplissement et dont le dépassement ne peut se faire que par l'intermédiaire d'un déplacement[298] du questionnement, donc un changement d'instrument.

Manipuler la figure

De simples rectangles de papier rigides, perpendiculaires ou parallèles, verticaux ou horizontaux, articulés ou mis en tension, sur leur grand ou petit côté, suffisent à décrire une infinité de dispositifs qui vont du plus élémentaire : l'équerre ou la parallèle (Illustration) entre deux éléments, au plus compliqué … Héritiers des *architectones* de Kasimir Malevitch, des compositions spatiales de Katarzyna Kobro et des constructions vides de Jorge Oteiza. (cf. Illustrations) :

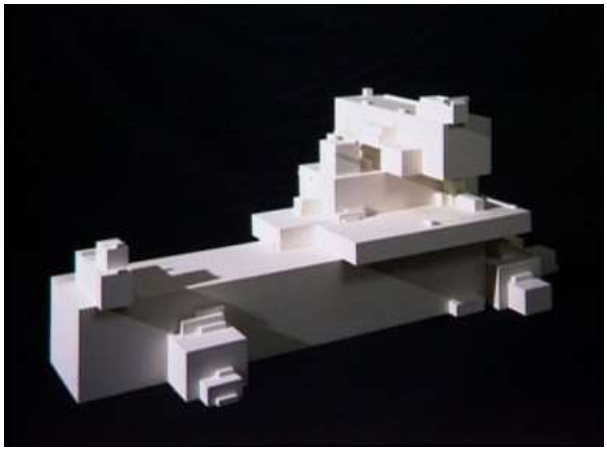
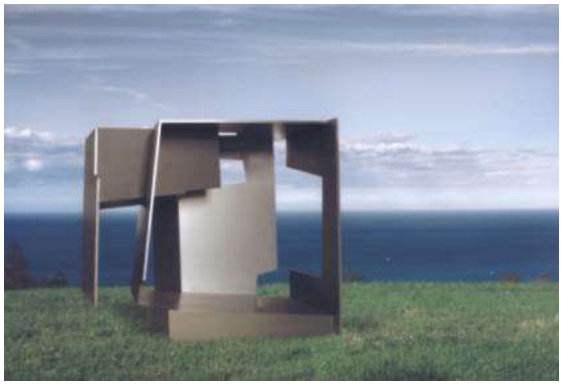


Illustration : Alpha, 1923-1978 ; Plâtre et verre, 33 x 37 x 84,5 cm, Kasimir Malevitch, reconstitué en 1978 par Paul Pedersen ; Musée d'art moderne de la ville de Paris (Centre G. Pompidou).

Illustration: "Spatial Composition" de Katarzyna Kobro (1898-1951) 1928; métal peint,40 x 64 x 40 cm; Musée Sztuki Łódz (Pologne).

[297] Décrites en particulier dès Interfolio 2 ou dans la recherche « 30 mètres par 30 mètres, un enseignement moderne du projet moderne », A. Dervieux, O. Gahinet, recherche BRA, 1999.

[298] Dans le sens de l'approfondissement sous une autre forme ou une autre échelle.



Illustrations : « Construction vide», Jorge Oteiza, 1957 à la biennale de Sao Paulo (Brésil) installé à St Sebastien (Espagne), 2002 ; Boîte vide avec grande ouverture, 1958, Métal, 46 × 45 × 39 cm). Musée Guggenheim à Bilbao.

Leur minceur privilégie leur espacement, leur épaisseur virtuelle et le mouvement quand leurs ainés du mouvement constructiviste favorisaient la masse et la cohésion. Monochromes évitant les caractères distinctifs, ils présentent les caractéristiques d'un vocabulaire abstrait pour un langage destiné à argumenter du rapport entre intentions et ordres sur la forme. La couleur permettra d'en codifier le rapport aux contextes (programmatique, urbain, …). Le savoir développé reprendra les capacités d'organisation simultanée en trois dimensions, de géométrie dans l'espace, de proportion relative, …, de synthèse. Le potentiel de chaque élément matérialisé réside dans la dissociation de chaque surface par une épaisseur.

Dans un programme complexe, la formulation d'un programme typique (dont le type est répertorié) par opposition aux parties atypiques du programme par essence banalisées et répétitives influencera dans la figure, la topologie et la géométrie des formes chargées d'incarner ces incidences. Le programme typique s'exprime par une forme reconnaissable, son accès est primordial comme son orientation et son articulation au sol et au site. Le programme atypique s'organise par une coupe qui offre la régularité des permanences d'orientation de lumière et de mesure sur une face, d'une part. Et l'expression du caractère distributif et de service sur l'autre face, d'autre part, dans un dessin d'ensemble chargé de l'expression du statut de l'édifice.

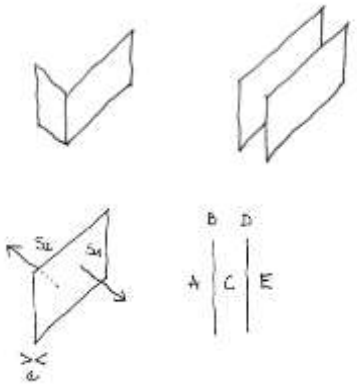


Illustration 2 : Les parallèles et l'équerre ; le potentiel d'épaisseur et d'orientation

La figure architecturale en différentes situations pédagogiques

Un workshops de cinq semaines

Par convention entre le Shibaura Institute of Technology de Tokyo et l'ENSAPB depuis 1995, devenu triangulaire avec HangYang University en 2011. Entre ces trois établissements et en particulier dans le cadre de ces workshops, une pédagogie issue de l'enseignement du groupe UNO a pu se développer une pratique originale du projet. Dès les phases initiales, la place de la maquette et celle du dessin perspectif tiennent une place importante. Le dessin numérique sert le développement du projet, le bon partage des tâches et la synthèse des expérimentations.

Après l'élaboration d'un diagnostic commun à des étudiants de culture architecturale contemporaine dispersée, le recours à la figure permet de partager une proposition qui exige de s'accorder sur les intentions principales et leur formulation hiérarchisée. La figure se développe aux échelles suivantes par l'intégration du travail de répartition programmatique spatialisée.

Illustrations : Workshop Septembre 2013, à Séoul. Figures de projets, développements jusqu'au projet final.

La figure comme outil de conception

La figure peut trouver sa pertinence dans un travail progressif de conception à différentes échelles d'application. En effet la notion de site et de problématique programmatique est transposable à l'échelle du mobilier, de l'édifice ou de la pièce urbaine.

À propos de la figure dans son enseignement de la Pièce Urbaine[299], Henri Ciriani précisait :

« Il vaut mieux pour faire une pièce urbaine, que sa figure, sa trace formelle soit simple. Sans figure simple, impossible d'utiliser des bâtiments riches... La figure complexe dans un bâtiment complexe est à bannir. Des figures simples, constituées par des bâtiments linéaires, bâtiments-lignes, vont permettre de traiter les rapports entre l'espace commun de la pièce urbaine et l'espace privé du logement. Si la figure n'est pas simple, si le bâtiment n'est pas extrêmement linéaire, il devient difficile de travailler les perpendiculaires à cette linéarité, dans laquelle on va résoudre tous les problèmes d'articulation, de pratique urbaine, entre le trottoir et les logements. Il est fondamental que la figure soit simple... »[300]

Les exemples pédagogiques, issus de la période fondatrice du groupe UNO, sont toujours explorés à l'ENSAPB en particulier par : Lorenzo Piqueras dans l'exercice du Logis[301] (cycle Licence), Laurent Salomon pour des projets d'équipements majeurs et de projets urbains (cycle Master) ou dans l'assemblage de maisons individuelles[302] conçues du meuble au paysage (4 fois 1 égalent 5) que j'encadre en 3ème année. Mais la figure comme outil pédagogique peut aussi conduire à un emploi prospectif. Je le développe pour l'identification du caractère du plan libre dans petit équipement public (EL 57, ex 30 30) également en 3ème année. Classer les propositions élémentaires du plan, faites par les étudiants, permet d'envisager consciemment le rapport qu'entretient le plan libre (plan du premier niveau) avec le volume enveloppe de base carrée (30x30x6m).

[299] En cinquième année cet enseignement du projet à l'échelle territoriale correspondait au développement d'un morceau de ville de 4ha environ, sur une aire « inoccupée » mais située.
[300] Pratique de la pièce urbaine, ma petite utopie, le 30 mars 1994, 69 p., édition : 1996 [Paris] Éd. du Pavillon de l'Arsenal.
[301] Ces exercices sont pratiqués, en France comme à l'étranger, dans plusieurs établissements, dont l'ENSA Normandie.
[302] À propos de cet exercice qu'il a également enseigné à Paris-Belleville, Simon Pallubicki déclare : « La figure des quatre logements occupe selon moi une place particulière ... La figure constitue, dans ce cas, un regard analytique et rétrospectif de l'étudiant sur son propre travail : être capable de voir et dégager ce qui est « essentiel ». Elle permet accessoirement à l'enseignant de mesurer le degré maîtrise et la capacité de rationaliser le processus projectuel de l'étudiant.

Dans cet exercice projectuel, le programme est organisé sur deux niveaux, le sol et un niveau dont les contours sont à définir mais dont les limites sont fixes, trente mètres par 30 mètres. Le déploiement de ce plan[303] dans les façades, le plan du sol et le plan de couverture font comprendre que les choix de périphérie du plan libre ont une incidence sur les échanges qu'il entretient avec son milieu. En particulier, les échanges lumineux guident le travail de construction de la spatialité au service de l'usage. Les échanges thermiques en fonction de l'orientation solaire et du climat (en Île de France pour cet exemple) sont actuellement au cœur d'une étude approfondie. Les conséquences de la relation entre plan libre et enveloppe sur l'énergie déployée dans tous les cycles liés à l'édification d'un équipement influencent la démarche pédagogique. Le choix comportement énergétique global dépend du choix du plan libre, dont la figure est le premier facteur identifié.

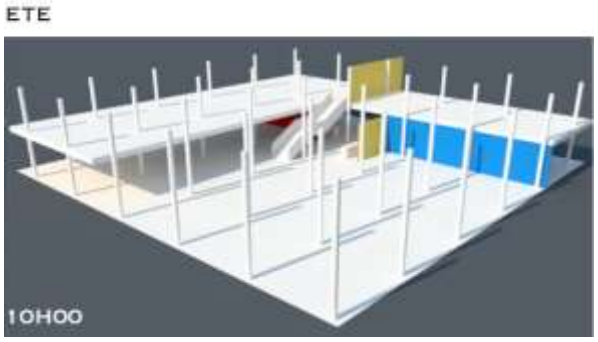


Figure en L, éclairée par la lumière d'été du matin.

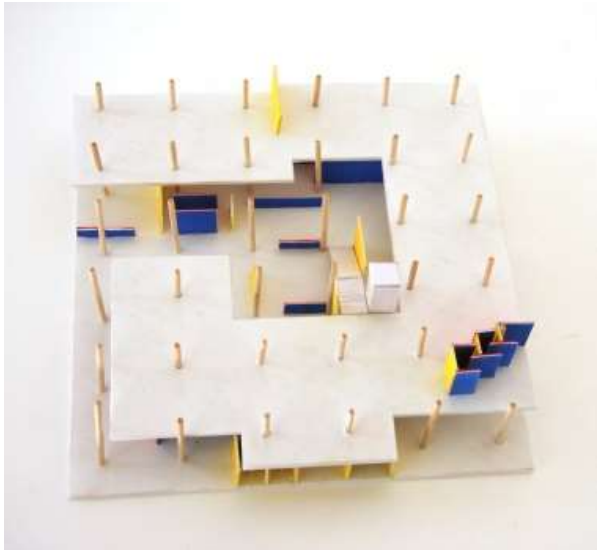
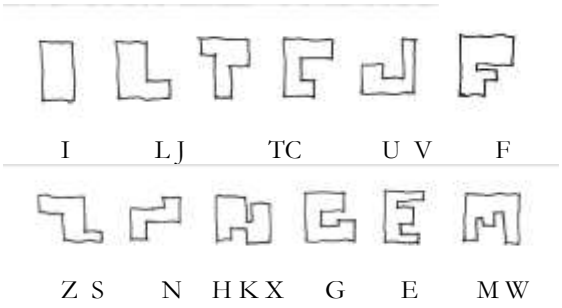
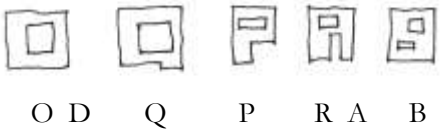


Figure complexe.



Illustrations : les figures élémentaires du plan libre.



Figures non opérationnelles : figures à cour ou trémie :

Figures initiales, et évolutions au 1/200ème, 1/100ème, 1/50ème. Calcul des échanges thermiques.

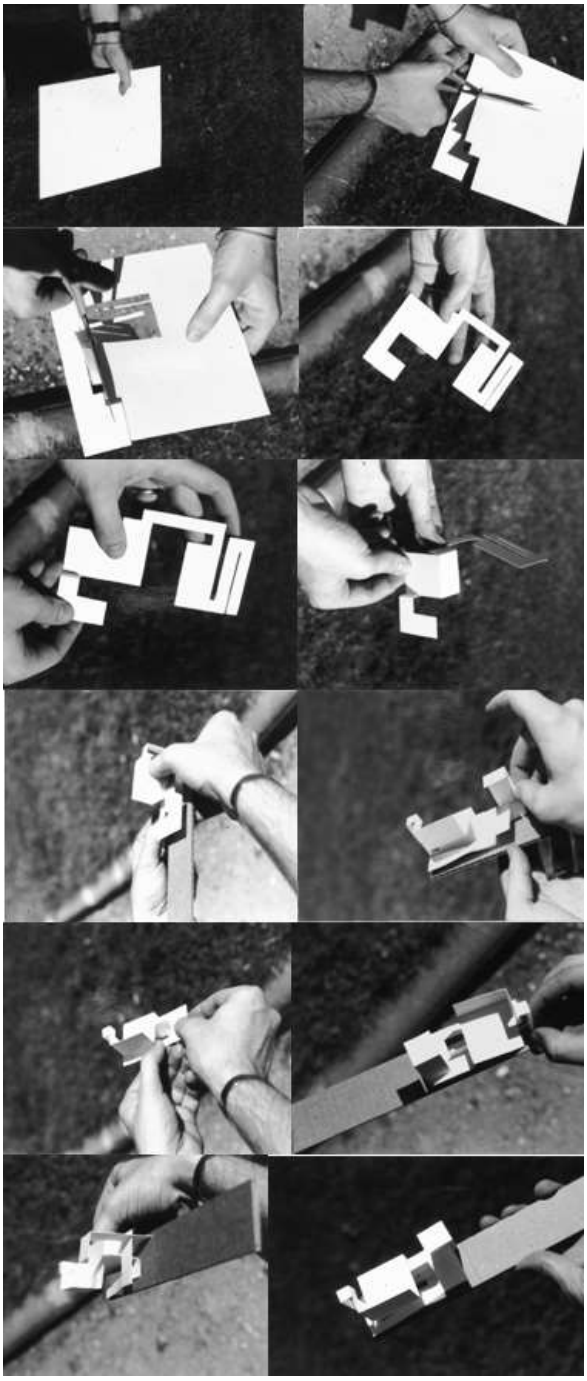
Illustrations : les figures du plan libre sous la lumière solaire; la couleur manifeste un potentiel d'usage selon la luminosité et l'horaire de l'éclairement.

[303] La liberté, du plan libre corbuséen considéré ainsi, a un très fort potentiel tridimensionnel. Contrairement au « plan fluide » missien (Pavillon de Barcelone, villa Farnsworth, etc.) qui influence le plan en deux dimensions seulement, longueur et largeur, neutralisant la verticalité par une symétrie horizontale.

La figure comme outil d'analyse

Si la figure a la vertu de guider le passage de l'idée vers la forme architecturale par une étape intermédiaire et spécifique on imagine que le processus est réversible de l'édifice à l'idée[304]. Il devrait être possible de déduire, à posteriori de sa réalisation, la nature figurale d'un édifice. Voici un essai en forme d'origami, mené à l'ENSAPB par un étudiant, F. Guynot de Boismenu, à propos de la villa Curutchet[305]. L'intérêt est de vérifier la cohérence d'un édifice dont les parties significatives peuvent, après réduction en deux dimensions, se combiner en un ensemble synthétique, porteur de l'essence du projet. Il est à remarquer qu'il est difficile de restituer sans bavardage la complexité d'un édifice par un document unique, qu'il soit graphique ou textuel.

La figure est un outil projectuel dynamique entre la réalité du site et de la commande fonctionnelle amorçant une esquisse du projet dont la nature spatiale, mise en attente, est à explorer en rapport avec les directives qu'elle incarne. Les contradictions qui apparaitront seront à arbitrer sans pour autant remettre en cause les acquis. La figure, contribue à la construction dialectique d'un enseignement du projet. En ce sens, elle devient un outil scientifique du raisonnement projectuel architectural[306]. Sa mise en interrogation nécessite un travail collectif de type séminaire (ou correction commune) où est commentée l'adéquation du résultat matériel avec l'énoncé des intentions. Il s'agit donc de la première figuration dans le processus de projet, du premier passage à la physique architecturale. Développé dans son apport conceptuel à la démarche de projet il reste à profiter de sa capacité dans la sphère physique de l'architecture : la structure et l'enveloppe, soit la matière et l'énergie. C'est une épure ni géométrique, ni constructive, ni spatiale, qui présume au plus prêt des intentions situées des engagements … *vers une architecture*.



12 Illustrations : Figure de la villa Curutchet, analyse, construction et maquette.

B.

[304] Sur la réversibilité du processus projectuel Christian Devillers a publié un article très intéressant où il met en question le déroulement logique et déductif du projet in : Christian Devillers, « Réponse à Françoise Choay », in cahier de la Recherche Architecturale, n°26, 2e trimestre, 1990, p. 97.
[305] Villa Curutchet, 1948, La Plata, Argentine, architecte Le Corbusier.
[306] Comme le sont les étapes perspectives du *foyer spatial* et du *point projectuel*, décrites dans Interfolion°2.

Conclusions

Modifier le 3030oscope.

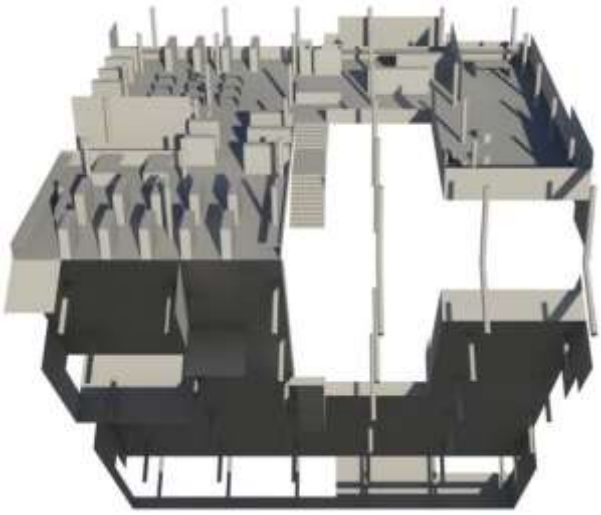
Au delà des décisions synthétiques que l'échelle du 1/50ème permet d'appréhender simultanément pour un équipement public de cette taille (bibliothèque de 1500m²), une étape présumée de la relation du bâtiment est celle de la mise en cohérence de la matérialité avec celle de sa mise en œuvre détaillée. En cycle licence , le 6ème semestre nous autorise à nous aventurer dans la direction du détail guidant la matière. Elle se traite autour d'une baie « entre usage et paysage ». La dimension emblématique de cet ouvrage de 3,66m par 3,66m. L'enseignant qui accompagne se déploiement est Jean Marc Weill.

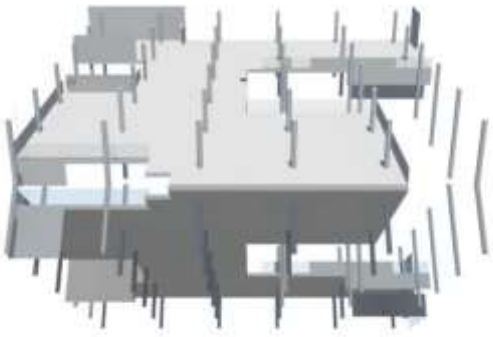
En deçà du 1/200ème, l'exercice, se déroulant hors situation, sollicite l'usage comme site. Il s'agit de construire l'espace répondant au programme autour du corps du pratiquant en mouvement. Les échelles territoriale et urbaine, inféodées à une compréhension du paysage, sont à associer au projet d'installation humaine. Je propose un enseignement au 2nd semestre en complémentarité du 1er. La question de l'énergie prend en considération les règles urbaines et celle de la conurbation.

D'un point de vue pédagogique, afin de rejoindre les capacités du 3030oscope, la modélisation du projet de l'étudiant peut apparaître comme la conclusion logique au 1/50ème de l'ensemble des questions abordées. Pourtant ce ne sont pas les questions résolues ! Une itération serait nécessaire, avant le recours à une échelle supérieure. Une nouvelle partition du projet, sans possibilité de représentation unitaire, en étant d'ailleurs presque automatiquement la conséquence. La modélisation peut être prise comme la meilleur « somme des parties » accessible à ce niveau d'études ? Cela ne doit pas occulter la nécessité d'une figuration synthétique de la question posée par le projet … La projetation éprouve la capacité du projeteur à installer, à chaque instant, dans une chronologie, les décisions partielles comme anticipations d'une unité à venir. Pour des raisons purement scalaires, la représentation unitaire d'un petit équipement au delà du 1/50ème oblige le recours à une représentation non détaillée alors que la définition du projet se détaille. C'est un paradoxe qu'il faut dépasser dans les enseignements de projet de second cycle. La continuité de la démarche se traduit par une discontinuité des représentations. Nous faisons l'hypothèse qu'il en résulte dans la démarche projectuelle une divergence entre les résultats en terme de spatialité et de matérialité, au moment où ils deviennent interdépendants. La question de la matière ne peut s'aborder sans le progrès substantiel provenant de la connaissance de sa mise en œuvre plus qu'à celle de sa décomposition détaillée (subtile ou non). L'outil projectuel réclamé met en rapport simultané deux échelles. Dans un autre ordre de difficulté et pour asseoir une pensée spatiale, l'étudiant de premier cycle s'est vu proposé la maitrise de l'articulation entre le plan et la coupe et l'intégrité de l'édifice associant par réversibilité le contenu et le contenant.

Illustration : Perspective du hall, Paerspective de la diagonale majeure du projet.

Illustration : Dessin du plan libre à l'issue du processus de 15 semaines, essais 2014.





Plan libre/Énergie/Échelles

3 versions du 3030oscope

Version 1/200ème
Au 1/200ème les informations essentielles concernant le rapport entre le plan libre et l'énergie dépendent de la figure du plan. Un répertoire des figures ultérieurement développées classe les familles de réponses formelles à cette étape du travail. Les grandes entités programmatiques : secteur adulte, secteur enfant, secteur numérique, administration, salle polyvalente, hall, en réponse aux quatre points précités. La figure du plan libre détermine l'ensoleillement potentiel du PH0 et du PH1 en fonction des surfaces offertes et recouvertes selon la course du soleil.

La qualité de réception lumineuse n'est pas dépendante de l'enveloppe (il n'y en a pas encore) mais de l'orientation solaire des arrêts majeurs du PH1. La quantité significative à mesurer ici par le 3030oscope/200ème est celle de la surface de PH0 et de PH1 éclairée par le soleil en fonction de la durée d'insolation. Au delà du potentiel de luminosité à servir le programme cette quantité représente le potentiel d'énergie devant être contrôlée au profit du confort recherché. Jusqu'à présent le binôme hypothèse/programme guidait la recherche d'une spatialité à la lumière juste et volontaire. La mise en maquette sous la lumière, révèle la dimension stratégique d'une masse énergétique résultante de l'installation topologique du programme. Au delà du prétexte d'éclairement, dont le contrôle est prématuré, c'est l'ensoleillement (comme quantité et emplacement) qui caractérise le choix de la figure du plan.
La répartition topologique du soleil comme enjeu de la maquette couleur. L'étude a été réalisée pour la lumière, la transposition pour la thermique

Version 1/100ème
Au 1/100ème l'attention à la diversité des usages à leur établissement et à leurs articulations se traduit par l'apparition d'opacités et de meubles. La complexité se traduit par une découpe plus ajustée de la périphérie du PH1. À cette échelle le plan gagne en précision et la spatialité se divise. La progression de la lumière cesse d'être littérale, elle est contrariée dans ses déplacements avant d'atteindre le sol. La sous-face du PH1 révèle des espaces à la lumière insuffisante. Éloignés des façades c'est par la surface supérieure (PH2) du volume enveloppe que peut provenir la luminosité naturelle suffisante.

L'enveloppe va se constituer à partir de la nécessité d'ouverture dans le PH2. Favorisant ainsi la pénétration d'une lumière zénithale et d'un ensoleillement privilégié axé nord/sud ou est/ouest. En l'absence de façades le 3030oscope/100ème va rendre compte des surfaces

ensoleillées par l'ouverture en PH2 et toutes les faces verticales.

Version 1/50ème
elle s'approche de la version ultime du 3030oscope. L'incidence dans les façades de la répartition ouvrant dormant, transparent/translucide/opaque et de leur comportement à la lumière et aux échanges thermiques est majeure. La manipulation de ces paramètres doit être mise en exergue pour que soit visible la valeur relative de leurs interactions. L'ouverture du toit devra trouver, grâce à cette version, une valeur d'incidence zénithale mieux identifiée. Le toit comme surface opaque homogène peut trouver une valeur dans le cadre d'une captation solaire. Cette version permet, en résumé, de mettre en parallèle les décisions stratégiques du choix de la nature de l'enveloppe et ceux de leur représentation en maquette (valeur de la coupure, du joint) et en dessin dans leur version préparatoire de l'étape suivante … vers la matière et l'imaginaire de sa mise en œuvre.

Remerciements
Remerciements aux étudiants du studio « 30 30 » des années 2011/2012, 2012/2013 et 2013/2014 qui, par leur participation active, leur intelligence du sujet et leur travail, m'ont fourni la documentation nécessaire à cette recherche pédagogique.

Bibliographie spécifique

- Bruno Reichlin, "Programme" avec Yves-Alain Bois, "Le Corbusier vs De Stijl", "Mallet-Stevens vs De Stijl", Catalogue de l'exposition "De Stijl et l'Architecture en France", Liège, 1985.
- Bruno Marchand cours de théorie Epfl : http://ltha.epfl.ch/enseignement_lth/theorie/polycopie_th4/polycopie_th_4.pdf
- Jacques Lucan, article, La coupe libre, article in AMC
  Composition, non-composition, Architecture et théories, XIXème-XXème siècles, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (Suisse), 2010
- Henri Ciriani, article p26 in « Corbu vu par », Pierre Mardaga éditeur, Liège, 1987
- Alan Colquh'oun : «Déplacements des concepts chez Le Corbusier» in A. Colquh'oun, Recueil d'essais critiques. Architecture moderne et changement historique, Pierre Mardaga Éditeur, Bruxelles, Liège, 1985
  Essays in architectural criticism, Cambridge, 1985
- Robert Slutzky et Colin Rowe, Transparence littérale et phénoménale, Droits et regards, éditions du demi-cercle, Paris, 1992, traduction de «Transparency: litteral or Phenomenal», Perspecta, n°8, 1963
- William J.R. Curtis, L'architecture moderne depuis 1900, Phaidon, 2006
- Willy Boesiger, Le Corbusier, Œuvres complètes, 8 tomes, ed. D'architecture Artemis, 1991
- Michel Corajoud avec Jacques Coulon et Marie-Hélène Loze, Lecture d'un jardin, recherche et article: les annales de la recherche urbaine éditions Dunod, N°18-19, juin 1983 *http://corajoudmichel.nerim.net/10-textes/01-versailles-lect.htm*
- Christian Devillers, Réponse à Françoise Choay, in cahier de la Recherche Architecturale, n°26, 2e trimestre , 1990, p. 97.
- Kenneth Frampton, L'architecture moderne, une lecture critique, Philippe Sers éditeur, Paris, 1985

Recherche

- *« 30 mètres par 30 mètres : un enseignement moderne du projet moderne », avec O. Gahinet,* 1997-2000, 168 p.
- *« L'espace de l'architecture moderne », direction C. Vié et H. Ciriani,* 1989 rapports intermédiaire et final, 164 p., 130 p., 183 p.

Catalogue, Revues

- Le catalogue UNO-UP8, Une année d'enseignement 1982-1983, Paris, Éd. Enseignement et Pratique, 1983, 63 pages, catalogue exposition à la Cooper Union.
- La revue Oppositions n°12, printemps 1978.

Articles pédagogiques

- « Apprentissage des outils de transformation de l'espace par des exercices projectuels » in Enseigner le projet d'architecture, actes du séminaire de Bordeaux, coordination Guy Tapie, École d'architecture de Bordeaux, 1993 ; avec Pierre David, 19 pages.
- « Point projectuel et foyer spatial » in Interfolio n°2, mars 1994, pages 13 à 15.

Solar Decathlon

Contexte

Les recherches *Reforme* ont été menées en parallèle avec la participation à deux concours Solar Decathlon Europe, celui de Madrid 2012 et Versailles 2014. Le Solar Decathlon Europe (nommé simplement SDE dans la suite) est une compétition universitaire, organisée par le gouvernement espagnol en accord avec le gouvernement des Etats Unis en 2010 et 2012 et par le gouvernement français en 2014, dont l'objectif est le développement de la recherche et la transmission des savoirs dans le domaine de l'énergie solaire.

Le concours vise à sélectionner sur la base de dix critères, la meilleure équipe universitaire ayant réalisé une maison individuelle alimentée exclusivement par l'énergie solaire incident sur sa parcelle. Dans la suite de ce document on considère le contexte de la compétition connu au lecteur.

En 2012, l'ENSA Paris-Malaquais a coordonné l'équipe *Astonyshine* en partenariat avec l'Université de Ferrara, le Polytechnique de Bari et l'Ecole des Ponts ParisTech, avec le support des ministères de la culture et de l'environnement et de 18 industriels. Placé en liste d'attente de janvier 2010 à mars 2012, *Astonyshine* a été réalisé en moins de six mois et présenté à Madrid en septembre 2012 en obtenant la 17ème place. Le coût consolidé de l'opération, inférieur à 260 k€ était très inférieur à celui de la plus part des équipes.

Le projet s'est déroulé sur trois semestres, mais l'ENSA Paris-Malaquais n'est intervenue avec deux studios de projet que dans les deux derniers semestres. Après avoir passé leur premier semestre à concevoir un habitat passif, basé sur l'énergie solaire et leur second semestre à dessiner les plans d'exécutions et construire eux même le prototype de la maison nommée *Astonyshine*[307], le groupe de douze étudiants de l'ENSAPM s'est envolé pour Madrid le 30 Aout 2012. Leur objectif était de remonter l'ensemble de la maison en 12 jours, afin de rentrer dans la compétition avec les 19 autres équipes de différents pays du monde.

La seconde moitié du mois de Septembre 2012 a été consacrée aux visites de professionnels et de particuliers. Ces deux semaines furent aussi le temps pour les 9 jurys d'évaluer les performances (architecturale, énergique, durabilité…) des maisons tout en évaluant en permanence leur température, leur humidité, leur qualité de l'air et leur luminosité.

[307] www.astonyshine.com

Projet Astonyshine

Dans cette section, on présente d'abord la stratégie de suivie vis-à-vis des évaluations prévues dans la compétition, on décrit ensuite le projet du point de vue de la distribution des espaces et des fonctions, des matériaux, de la structure et des systèmes constructifs.

Astonyshine vise l'intégration de nouvelles technologies dans l'architecture des maisons alimentées par l'énergie solaire et la définition de nouveaux concepts dans le projet d'architecture qui soit appuyés par ces technologies, avec le but ultime de la proposition de solutions innovantes et de l'augmentation des performances des solutions traditionnelles.

La vision globale de la question énergétique mène à la recherche d'une construction impliquant la moindre anergie grise et donc réalisée avec un maximum de matériaux biosourcés ayant subi un court cycle de transformation et pouvant être recyclés ou réutilisés en l'état. La minimisation de l'énergie grise prime sur celle de la consommation annuelle, dans le limites actuelles du bilan présenté dans ce document sur ces deux facteurs (l'énergie grise est actuellement l'équivalent de 50 ans de consommation).

Six entrées définissent cette stratégie:

- L'emploi de la pierre de taille qui, grâce aux avancées technologiques et aux nouvelles méthodes de projet numérique, promet des avantages du point de vue du comportement énergétique, hygroscopique et thermique, de la durabilité, de l'esthétique et du processus de fabrication et de construction.
- Le recours à des systèmes solaires à concentration, photovoltaïques et thermiques — pour répondre aux besoins énergétiques de la maison avec une plus grande efficacité et des coût inférieurs à ceux qui peuvent être obtenus par des panneaux photovoltaïques standard —, par la proposition de nouvelles idées sur l'insertion morphologique et technologique de ces systèmes en architecture.
- Les systèmes à concentration permettent l'utilisation de cellules photovoltaïques à haute performance sans grandes augmentation des coûts et optimisent la quantité de matière utilisée en réduisant les pressions sur les stocks (par exemple de polysilicone).
- Le contrôle distribué du champ photovoltaïque incorporé dans chaque module et piloté pour extraire le maximum d'énergie. Ce contrôle permet la reconfiguration dudit champ, qui peut se rendre nécessaire par conséquent de facteurs externes qui réduisent au moins partiellement la production d'énergie, dans le but de minimiser le décalage des modules let les pertes dues à l'ombrage de manière plus efficace que par les convertisseurs MPPT centralisés actuellement utilisés.
- La recherche de nouveaux détails, matériaux et technologies pour l'interface entre les modules solaires et la structure du bâtiment, pour l'imperméabilisation, le contrôle de la température, la ventilation, la préfabrication et la réduction du coût.
- La recherche d'un éclairage optimisé, naturel et artificiel, pour satisfaire aux critères de quantité et qualité lumineuse et pour créer des effets spatiaux et lumineux.
- L'intégration du projet d'architecture et de sa structure avec la logistique de projet, pour réduire le coût générale de la production et de la construction en augmentant leur qualité et la durabilité de la filière et en réduisant les risques du travail.

Ces points, qui ont été traité conjointement, ont conduit aux résultats suivants:

- *Astonyshine* était une maison en pierre de taille et bois. Les parois en pierre exploitent une typologie constructive qui a été inventée en France à la fin du XVII^{e} siècle sans jamais avoir été appliqué de manière significative. Les recherches conduites pour *Astonyshine* aux Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau ont permis la réalisation de la première voute en pierre de taille en forme de selle jamais construite, une forme qui a été conçue pour marier les avantages de la structure concave et les besoins de convexité propres de la captation solaire.
- *Astonyshine* intégrait un brevet, le "*SolarFLight*" qui rend la concentration solaire possible en s'intégrant à l'architecture. Comme indiqué au point précédent, la forme de la toiture de *Astonyshine* correspond à cette intégration sur une structure en pierre.
- Les systèmes de contrôle distribué récemment développés par STMicroelectronics (SPV100 et SPV1020) ont été utilisés pour la première fois dans un contexte de logement.
- La structure en pierre était entièrement préfabriquée et transportable. A notre connaissance il s'agit du premier exemple de construction en pierre préfabriquée, avec un temps de pose de la construction de l'ordre de la semaine.

Tous ces résultats dérivent de la volonté d'organisation du projet autours des thèmes de l'économie énergétique, qui se réfléchît sur les choix des matériaux et des technologies constructives, le choix de la méthode de conversion de l'énergie solaire et le choix du système de fabrication.

Au cœur du projet *Astonyshine* se trouve l'idée que l'intégration des nouvelles technologies ne peut pas toujours se faire sans une révision de la forme architecturale et des éléments de l'architecture. Il en suit la volonté de montrer les systèmes qui s'ajoutent à la maison pour en accroître les capacités de conversion d'énergie et en réduire l'empreinte écologique, plus que cacher ou incorporer ces systèmes dans les formes habituelles

Le second souffle de *Astonyshine* est l'idée que l'architecture doit retrouver un langage pour la pierre de taille. L'emploi de ce matériau à reçu une attention renouvelée dans les dernières années. En partant de l'étude du passé, des chercheurs contribuant à *Astonyshine* ont conçu des nouveaux systèmes structurels, basés sur la stéréotomie, pouvant conjuguer efficacement l'aspect esthétique et des qualités environnementales.

La pierre de taille est en effet intéressante pour l'environnement, en particulier si son lieu d'extraction n'est pas loin du lieu de construction (la valeur de 1000 km est souvent indiqué comme limite de rentabilité écologique, mais il faut souligner que la pierre peut se transporter lentement, ce qui peut réduire sensiblement l'empreinte environnementale de la tonne-kilomètre pour ce transport), elle peut être récupérée lors d'une démolition et réemployée ou en tout cas recyclée sans inconvénients; elle génère une pollution de l'eau et de l'air très limitée lors de la construction. La coupe de la pierre ne génère pas de gaz à effet de serre, elle ne comporte aucun risque de toxicité, produit des poussières totalement contrôlées et fait un usage totalement contrôlé de l'eau.

De plus, la pierre est une ressource inépuisable.
La taille de la pierre est aujourd'hui une industrie technologique, basé sur la conception et la fabrication assistées par l'ordinateur, qui produit peu de pertes de matière et se sert efficacement de l'énergie. La pénétration des structures en pierre de taille dans le marché de l'immobilier est néanmoins aujourd'hui très limitée, à cause du manque de solutions techniques capables de répondre à la liberté de forme propre de l'architecture d'aujourd'hui et du coût des opérations de chantier liées traditionnellement à ce matériau.

Le problème fondamental quand on aborde la question de la recherche d'une forme architecturale cohérente avec la captation solaire par concentration et la construction en pierre de taille se trouve au centre de l'architecture: quelle forme donner au toit sachant que la concentration de la radiation solaire requiert des formes convexes alors que la descente des charges par stéréotomie requiert des formes concaves?

La réponse de *Astonyshine* est totalement nouvelle. Une voûte en selle en pierre de taille capable de porter des charges par sa courbure et, en même temps, donnant un support optimal pour suivre la course du soleil. La surface réglée ainsi obtenue porte les éléments « *SolarFLight* » brevetés par l'Université de Ferrara.

La voute a été projeté en adaptant un brevet de l'académie des sciences du XVII^{e} siècle pour créer des composantes préfabriqués mobiles qui peuvent être mis en place sans l'aide de faux œuvres. Il s'agira de la première voûte en selle jamais construite en pierre de taille. Le volume couvert par une forme si complexe devait être le plus simple possible. Par conséquent le plan carré a été choisi et la maison a été projeté pour révéler la forme ainsi résultante d'un prisme idéal coupé supérieurement par la surface en selle. La pierre est traitée sur les façades pour donner une impression générale de pure géométrie et le rendu d'un solide primordial mais non primitif, alors que la selle est la seule surface extérieure non en pierre.

Le bâtiment s'inscrit dans un prisme de 10 m x 10 m x 6 m, restant au centre de la parcelle de 20 m x 20 m accordée par le concours. L'empreinte architecturale totale de 100 m^2 permit de générer un espace habitable de 100 m^2 dont 70 m^2 au rez-de-chaussée.

La forme de l'intrados de la toiture reproduit celle de l'extrados, avec un système structurel qui minimise le plus que possible les apports pouvant déranger la pureté de la forme et l'appareillage de la pierre créant un dessin qui, évoquant celui d'une œuvre de vannerie, suggère une sensation de légèreté.

Le volume intérieur est partagé dans une zone principale de séjour et une bande contenant les chambres et les services. Le séjour à double hauteur, situé du coté sud du bâtiment et communiquant vers le jardin par une grande baie vitrée sur la façade sud, embrasse toute la voûte d'une seule vue. Les autres locaux se trouvent dans une bande à double hauteur située dans la partie nord. On y trouve, au rez-de-chaussée, la cuisine, la salle de bain, une chambre et le local technique, à l'étage deux chambres non clôturées.

Le projet de la structure se base sur deux points forts typiques de la conception moderne des structures en pierre: avoir une descente des charges avec poussée minimale et reprendre cette poussé avec des éléments appropriés et créer un système globalement cohérent pour la reprise des actions horizontales, spécialement en zone sismique.

En même temps les solutions envisagées ont été conçues pour réduire le besoin de faux œuvres et pour permettre la préfabrication et le transport de pièces de grande dimension. Les connaissances utilisées ont été acquises au cours des dernières années grâce aux recherches menées dans le laboratoire *GSA Géométrie Structure Architecture* de l'ENSAPM.

La préfabrication, le transport et le levage des éléments en pierre de taille de la construction ont été les préoccupations principales pendant le projet. *Astonyshine* part de l'idée que ces opérations sont essentielles pour la pénétration de la pierre de taille dans le monde de l'architecture contemporaine et c'est pour atteindre cet objectif que le groupe *Fagioli*, leader mondial dans la logistique de projet, a été invité à participer au partenariat. Le résultat de cette collaboration est une construction modulaire, transportable par éléments de dimension maximale de sorte à réduire les temps d'assemblage en chantier et maximiser les opérations de préfabrication et préparation en usine.

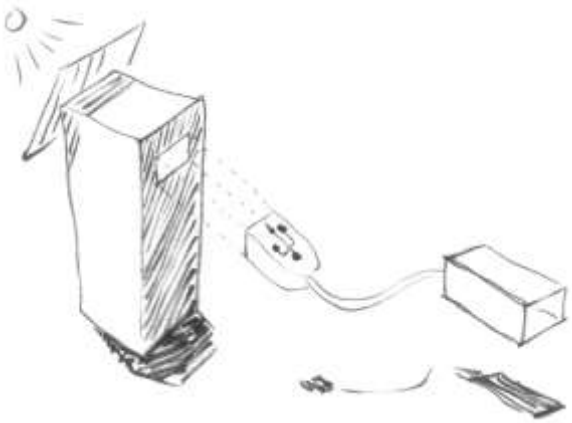
La pierre de taille a plusieurs propriétés positives pour la construction. La première est la ventilation naturelle générée par sa perméabilité (supérieure de deux ordres de grandeurs de celle du béton), qui évite les risques qui dérivent de l'étanchéité des enveloppes.

La seconde propriété est sa bonne qualité en climat chaud: l'inertie thermique apportée par la masse de la pierre permet au bâtiment d'exploiter le décalage des températures internes par rapport aux externes, ce qui est intéressant où des fluctuations thermiques se produisent quotidiennement (nuit fraiches et journées chaudes). De plus la pierre permet de régulariser l'humidité de l'air et réduit la température ressentie avec un effet de parois froide utile en été et facilement contrôlable en hiver (par superposition de tapisseries).

Le troisième effet positif qui peut être obtenu par l'emploi massif de la pierre est la réduction de l'effet de montagne solaire. Par rapport à d'autres matériaux de revêtement la pierre a une couleur plus stable et souvent claire, ce qui permet de réduire l'albédo (maximisé par exemple par une surface asphaltée) et réduire par conséquent l'effet incontrôlé de remontée thermique en proximité des villes qu'on appelle montagne solaire.

Le besoin global de chauffage calculé, compte tenu des apports internes est de 2,4 kWh/m², celui de climatisation de 1,0 kWh/m². Sur un an ces besoins sont respectivement de 4,0 kWh/m²/an et 0 ?5 kWh/m²/an. Les besoins électroménagers et d'éclairage ajoutent une consommation électrique de 2300 kWh/an en moyenne. Le besoin électrique pour l'eau chaude produite par chauffe-eau solaire s'élève varie entre 0 et 200 kWh/an en fonction du nombre de capteur placés.
A partir de ces considérations le besoin estimé de surface CPVT est de 20 m².

Projet « LivLib »



En 2013 l'Université Paris-Est a été admise à participer au concours Solar Decathlon Europe 2014, dont la phase finale se tiendra en juin à Versailles, avec un groupe d'écoles de l'Université contenant l'ENSAPM. L'équipe [Re][For][Me] se trouve ainsi à nouveau active dans cette compétition.

En 2014 la compétition a été orientée vers la question urbaine, un thème très important pour la ville de Paris que nous représentons. L'idée du projet, qui s'appelle « *LivLib* » se base sur celle *d'Infrastructures Solaires Urbaines* : si la densification de la ville de Paris soumet les futurs propriétaires à un prix du sol plus important que en banlieue et la demande d'une économie verte impose des niveaux d'investissement plus élevées, c'est la création *d'Infrastructures Solaires Urbaines* (les ISU) qui peut fournir la solution en mitigeant le prix à payer pour habiter durablement en ville.

« *LivLib* » propose la réalisation d'un système de « *hubs* », c'est à dire des ISU capables de collecter et gérer l'énergie, de traiter l'eau et les déchets, de créer les connexions locales au réseaux urbains. Chaque « *hub* » contiendra un certain nombre de ports, dans lesquels viendrons s'attacher (« *to plug* ») des capsules contenant des appartements ou d'autres activités (télétravail, studio, crèche, etc.). Les « *hubs* » seront le reflet de la ville et de sa politique urbaine, les « *capsules* » seront le résultat du libre marché de l'habitation. Tout échange d'énergie et de matière étant canalisé par le couple « *port* » et « *plug* », la responsabilité individuelle pourra être valorisée.

D'un autre coté les capsules pourront se détacher d'un « *hub* » pour s'attacher dans un autre, afin de réduire les transports et permettre aux propriétaires de garder leur habitation toute la vie. Grace à leur construction et assemblage modulaire, les capsules pourront s'associer pour créer des espaces de vie de la taille voulue.
Le projet est actuellement au début de la phase d'exécution. Il présente une réelle innovation sur le plan du rapport entre la ville et les individus et pour une gestion durable des énergies et des masses dans la ville.

Annexes

Elles comprennent :
Des compléments sur les *Représentations*
Des compléments sur la *Formalisation*
Des compléments sur les *Métamorphoses*

Compléments pour les Représentations

Extrait d'état de l'art des représentations

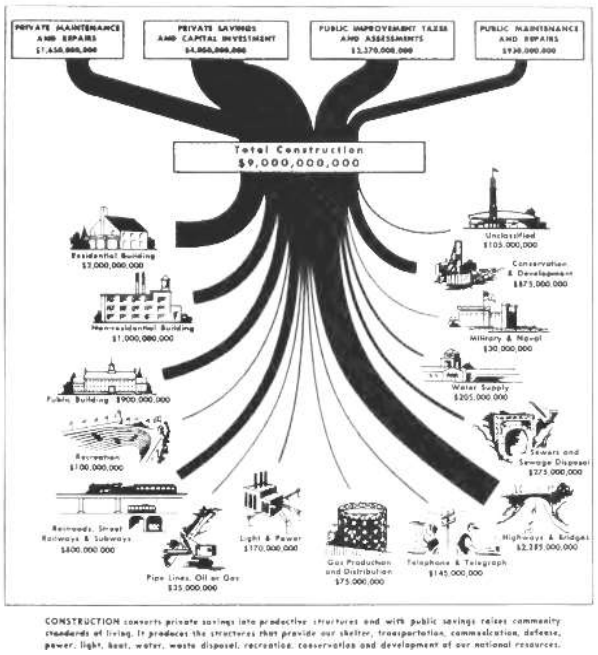
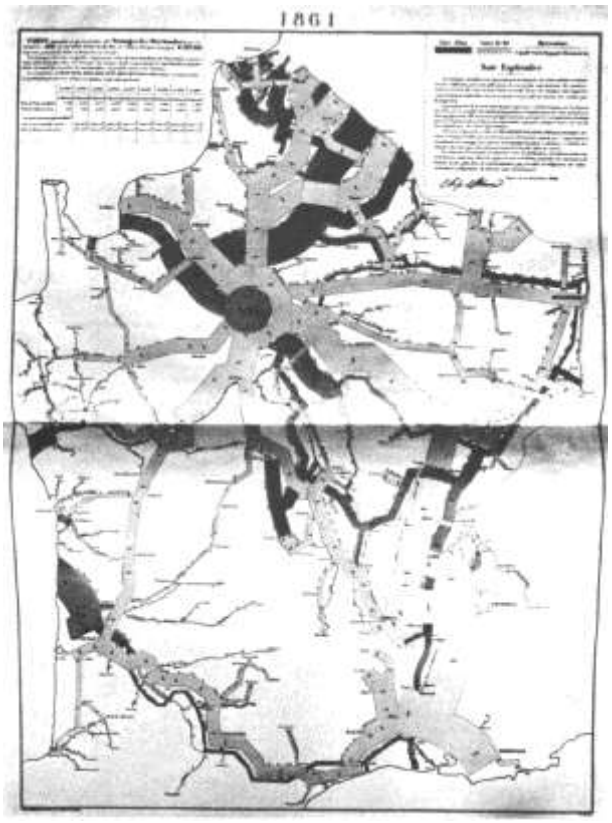

PRIVATE MAINTENANCE AND REPAIRS
PRIVATE SAVINGS AND CAPITAL INVESTMENT
PUBLIC IMPROVEMENT TAXES AND ASSESSMENTS
PUBLIC MAINTENANCE AND REPAIRS
Total Construction
$9,000,000,000
Residential Building
Nonresidential Building
Public Building
Recreation
Railroads, Street Railways & Subways
Pipe Lines, Oil or Gas
Light & Power
Gas Production and Distribution
Telephone & Telegraph
Water Supply
Military & Naval
Sewers and Sewage Disposal
Highways & Bridges
CONSTRUCTION converts private savings into productive structures and with public savings raises community standards of living. It produces the structures that provide our shelter, transportation, communication, defense, power, light, heat, water, waste disposal, recreation, conservation and development of our national resources.

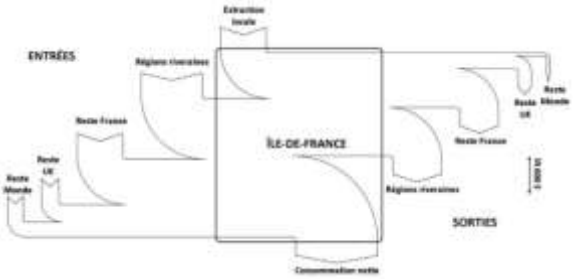
Diagramme de flux et loi de conservation Flow Map Layout, Doantam Phan, Ling Xiao, Ron Yeh, Pat Hanrahan, and Terry Winograd, Stanford University.



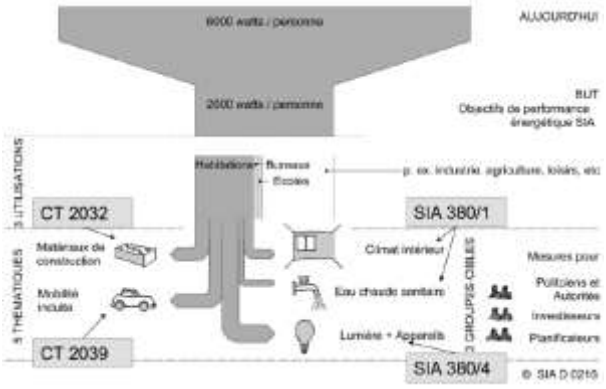
Carte figurative et approximative de l'étendue des marchés de houilles et de cokes étrangers dans l'empire français autours de 1858 (Minard, C.J.)

Carte figurative et approximative de la houille anglaise exportée en 1860 (Minard, C.J.)

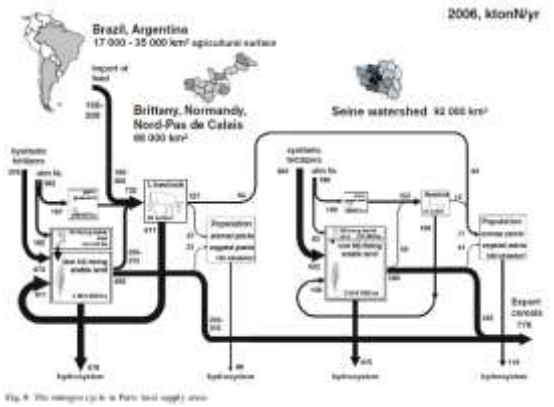
Metrography attempts to explore this phenomenon using the most famous of transit maps: the London Tube Map. (The representation distorts actual geography according to the grid of the Tube Map.) http://looksgood.de/log/downloads/metrography_map/index.html



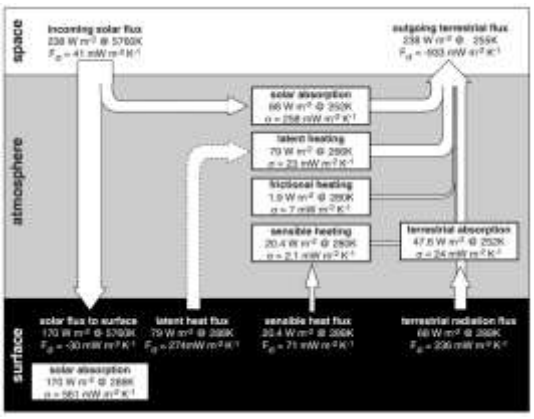
Flux de produits agricoles et alimentaires en Ile-de-France, 2003 (d'après S.Barles)



Cahier technique SIA 2040, Société à 2000 Watt



Le cycle de l'azote dans les zones d'approvisionnement alimentaire de Paris, 2011 (d'après G.Billen)



Global budget of entropy production by diabatic Earth system processes. Based on Peixoto et al. (1991). Note that the latent heat flux has been corrected from Peixoto et al.'s estimate, ibid

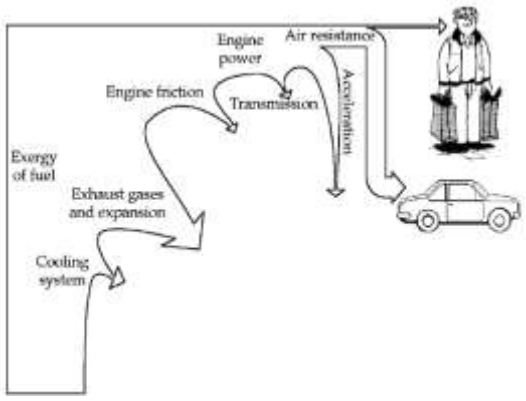
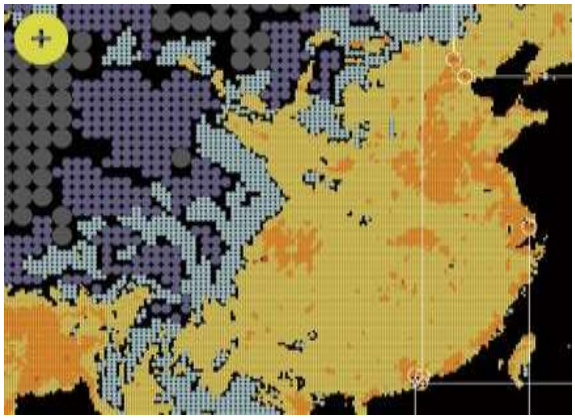


Diagramme représentant les transformations successives du flux d'exergie pour une voiture (Mei Gong et Göran Wall[308])

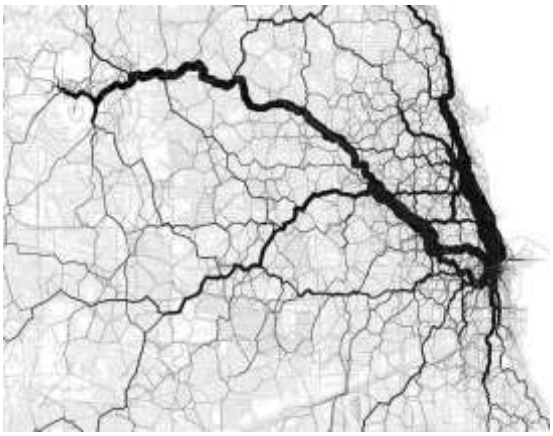
This representation reveals energy consumption through color codes that depict each singular area situation, with the mouse over you get further information on the singular "pixel". http://modi.mech.columbia.edu/nycenergy

[308] *On exergy and sustainable development—Part 2: Indicators and methods, Exergy Int. J. 1(4) (2001) 217–233*



This visualization maps population density using circles of various size and hue. Larger, darker circles show areas with fewer people, while smaller, brighter circles highlight crowded cities. Representing denser areas with smaller circles results in additional geographic detail where there are more people, while sparsely populated areas are more vaguely defined. http://fathom.info/dencity/

A multi-layer dynamic and interactive visualization that reveals connections between researchers: the main part is not geo-localized, it returns the dimension and the relationships between the network (number of lines, dimension of circular elements); on the right while the exploration change the interface reveals geographical informations and statistics as well. http://max-planck-research-networks.net/



Visual model: defining dimension of cells and thickness of lines depending on numbers of contributions and distance between contributions. http://www.fastcodesign.com/1665884/infographic-of-the-day-could-twitter-help-us-create-smarter-transit-routes

An interactive visualization that allows users to select an area of interest, start a specific query on carbon consumption and get information on related climate change scenarios. http://viz-carbontool.appspot.com/

A visual exploration through time and space that depict the number of users of the different underground lines (color code) of New York. Map based navigation with a time slider, visualization could be switched from a dot-map to a line-map; informations on singular points are provided (mouseover) possibility to switch from absolute to relative data visualization http://diametunim.com/shashi/nyc_subways/

Static visualization that reveals movement of people between different districts of the city of Geneva, with entrance and exit fluxes enlightened, and with a time-trend provided as well. http://villevivante.ch

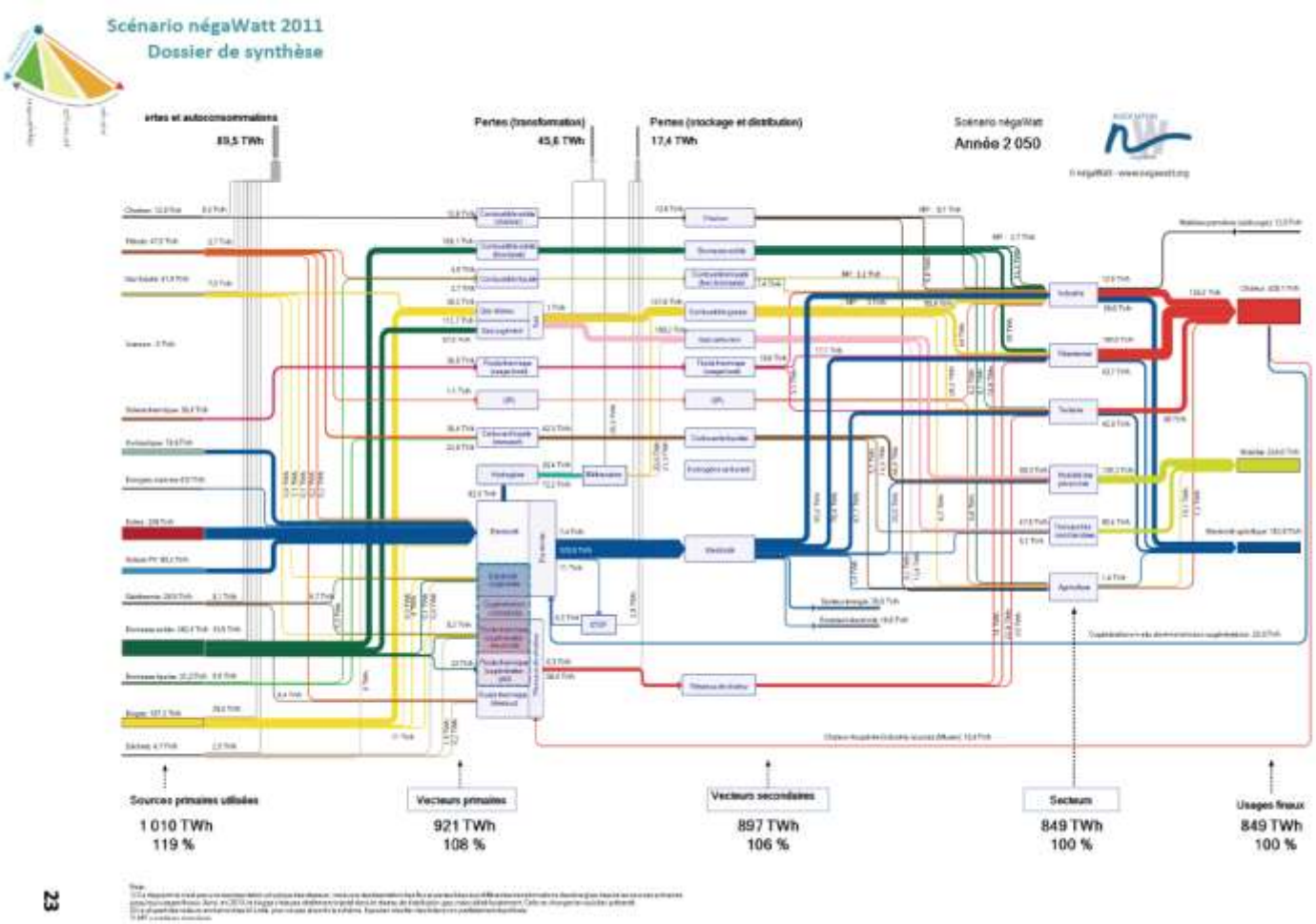


Diagramme de Sankey présentant le raccordement entre demande (à droite) et offre (à gauche) et une faible partie de ponction sur les stocks (à gauche). Source : négaWatt, 2011

Structure de données pour l'outil Reforme

Fiche typique entre trois partitions spatiales

FICHE D'INTERACTION ENTRE 3 PARTITIONS

|P> Données démographiques

Population

Données amont

			1750	1850	1950	2000	2050
pA	Paris		x	x	x	x	x
pB	France		x	x	x	x	x
pC	Monde		x	x	x	x	x

Composantes

p1	Paris	= pA
p2	France moins Paris	= pB-pA
p3	Monde moins France	= pC-pB

|C> Vecteur-consommation

Données amont

			1750	1850	1950	2000	2050
cA	Paris		x	x	x	x	x
cB	France		x	x	x	x	x
cC	Monde		x	x	x	x	x

Composantes

c1	Paris	= cA
c2	France moins Paris	= cB-cA
c3	Monde moins France	= cC-cB

|M| Matrice richesse-échange

Richesse

Données amont

			1750	1850	1950	2000	2050
mA	Paris		x	x	x	x	x
mB	France		x	x	x	x	x
mC	Monde		x	x	x	x	x

Termes diagonaux

m1	Paris	= mA
m2	France moins Paris	= mB-mA
m3	Monde moins France	= mC-mB

Echanges

m12		x	x	x	x	x
m13		x	x	x	x	x
m21		x	x	x	x	x
m23		x	x	x	x	x
m31		x	x	x	x	x
m32		x	x	x	x	x

|S> Vecteur ciel

Données amont

			1750	1850	1950	2000	2050
sA	Paris		x	x	x	x	x
sB	France		x	x	x	x	x
sC	Monde		x	x	x	x	x

Composantes

s1	Paris	= sA
s2	France moins Paris	= sB-sA
s3	Monde moins France	= sC-sB

|G> Vecteur sous-sol

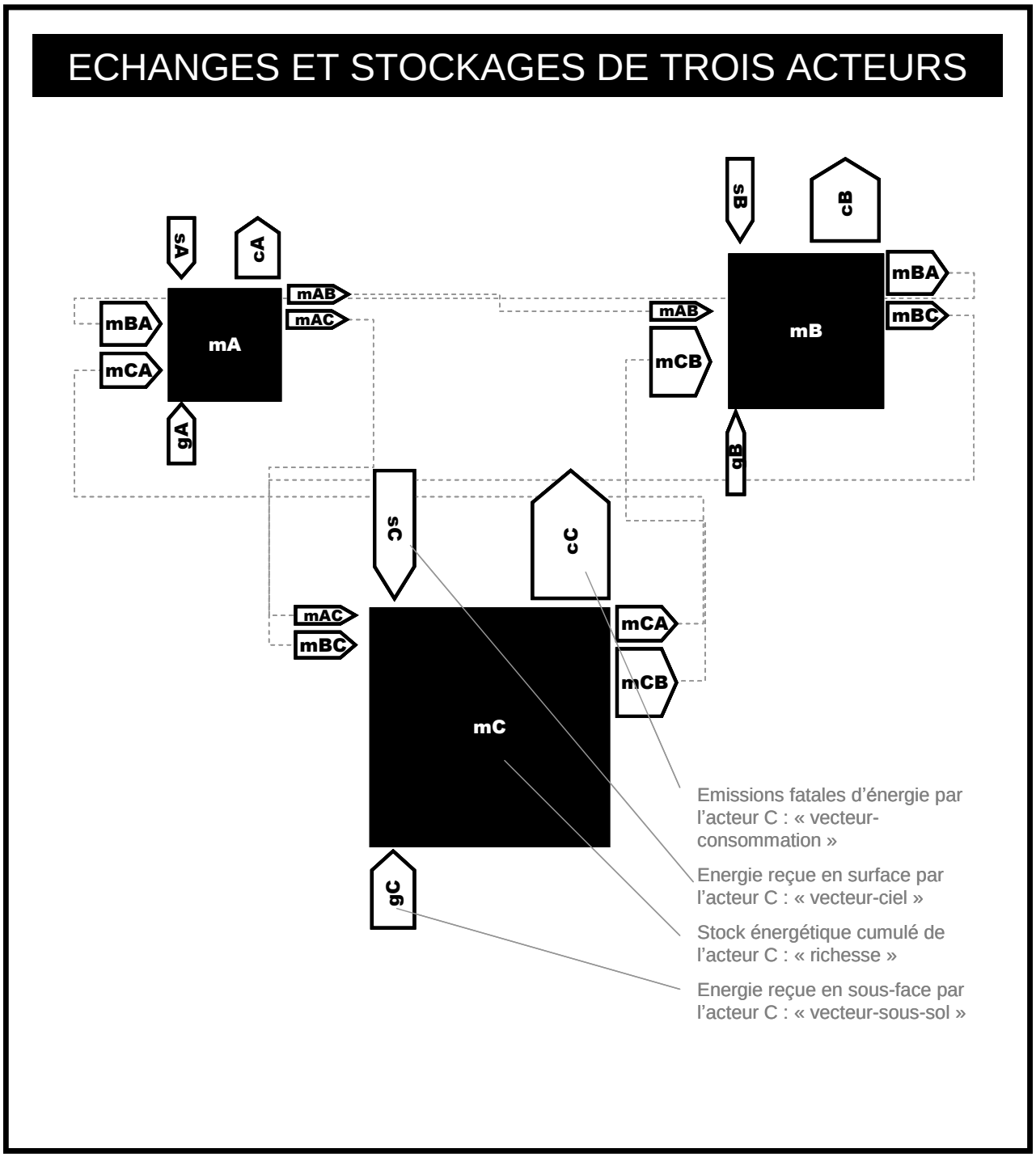
Données amont

			1750	1850	1950	2000	2050
gA	Paris		x	x	x	x	x
gB	France		x	x	x	x	x
gg	Monde		x	x	x	x	x

Composantes

g1	Paris	= gA
g2	France moins Paris	= gB-gA
g3	Monde moins France	= gC-gB

Exemple d'interactions entre trois acteurs



Compléments pour la Formalisation

Espace vectoriel de l'énergie

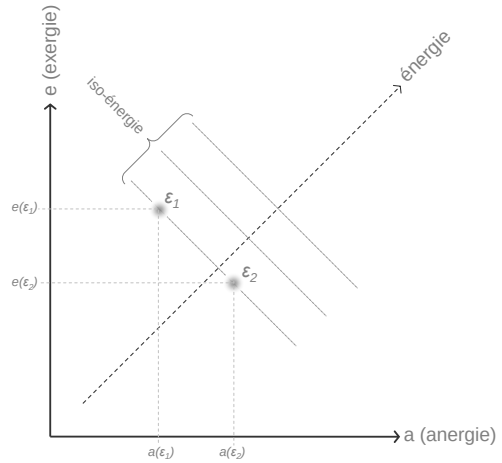
Le pseudo-espace vectoriel E

Définition

Nous définissons un pseudo-espace vectoriel[309] doté de l'addition sur l'espace bidimensionnel des nombres réels positifs. Nous prenons comme axiome que énergie, anergie et exergie sont positives ou nulles.

Nous noterons *E,* cet espace de décomposition de la donnée énergétique.

$$E = R^+ \times R^+$$



La norme d'une donnée énergétique se lit en projection sur la courbe d'équation[310] y=x. Les points ε_1 et ε_2 possèdent la même quantité d'énergie. Toutefois la qualité exergique de ε_1 est supérieure à celle de ε_2. (ReForMe)

Opérations sur E

Loi d'addition

On retient la définition suivante :

$$E \times E \to E$$
$$(\underline{\varepsilon}, \underline{\varepsilon'}) \mapsto \underline{\varepsilon} + \underline{\varepsilon'} = (a, e) + (a', e') = (a + a', e + e')$$
$$(\underline{\varepsilon}, \underline{\varepsilon'}) \mapsto \underline{\varepsilon} + \underline{\varepsilon'} = (a, e) + (a', e') = (a + a', e + e')$$

Notons que cet espace doté de l'addition n'a pas de structure de groupe puisque chaque vecteur n'a pas d'opposé par construction.

Loi produit avec un scalaire

Dans le cas d'une multiplication par un scalaire positif, la loi produit est alors définie de la façon suivante :

$$R^+ \times E \to E$$
$$(\lambda, \underline{\varepsilon}) \mapsto \lambda \cdot \underline{\varepsilon} = \lambda \cdot (a, e) = (a, e) \cdot \lambda = (\lambda a, \lambda e)$$

Loi produit

On associe la multiplication dans *E* au sens du produit scalaire usuel :

$$E \times E \to R^+$$
$$(\underline{\varepsilon}, \underline{\varepsilon'}) \mapsto \underline{\varepsilon} \cdot \underline{\varepsilon'} = (a, e) \cdot (a', e') = aa' + ee'$$

Notons que ce produit est commutatif et sera nul si et seulement si un vecteur est de l'anergie pure, tandis que le second est de l'exergie pure[311].

[309] Dans le sens où l'opposé d'un vecteur n'a pas d'existence au sein de E.

[310] Nota : l'échelle de graduation sera alors différente et devra être multipliée par la racine de 2.

[311] Ou sinon enfin au moins l'un des deux vecteurs est nul.

Métrique sur E

Norme sur l'espace E

Nous dotons E d'une norme E définie de la façon suivante :

$$E \rightarrow R^+$$
$$\underline{\varepsilon} \mapsto E(\underline{\varepsilon}) = E[(a,e)] = a + e$$

Cette norme permet d'évaluer la quantité d'énergie d'un vecteur-énergie donné.

Nous vérifions aisément que E possède bien l'ensemble des propriétés d'une norme :

$$E(\underline{\varepsilon}) = E[(a,e)] = a + e = 0$$
$$\Rightarrow a = e = 0 \Rightarrow \underline{\varepsilon} = 0$$

Notons aussi que :

$$\forall \lambda \geq 0, E(\lambda \cdot \underline{\varepsilon}) = \lambda E(\underline{\varepsilon})$$

Enfin, nous retrouvons bien l'inégalité triangulaire (qui est dans cette définition une égalité par construction)

Quelques propriétés particulières

Notons que :

$$\sqrt{\underline{\varepsilon} \cdot \underline{\varepsilon}} = \sqrt{a^2 + e^2} \leq E(\underline{\varepsilon})$$
$$\sqrt{\underline{\varepsilon} \cdot \underline{\varepsilon}} = \sqrt{a^2 + e^2} \leq E(\underline{\varepsilon})$$

Cela correspond au fait que la distance de Manhattan[312] est plus grande que la norme euclidienne traditionnelle.

Notons aussi que la quantité :

$$\frac{\underline{\varepsilon} \cdot \underline{\varepsilon}'}{E(\underline{\varepsilon})E(\underline{\varepsilon}')}$$

sera d'autant plus petite que les *qualités énergétiques* des deux vecteurs seront différentes.

[312] Voir en annexe

Projections anergique et exergique

Définition

A l'instar du corps des nombres complexes où les formes linéaires *Re*[313] et *Im*[314] permettent la projection des composantes, nous définissons ci-après les analogons sur E.

On définira les applications a et e de la façon suivante qui opèrent :

$$E \rightarrow R^+$$
$$\underline{\varepsilon} \mapsto a(\underline{\varepsilon}) = (a,e) \cdot (1,0) = a$$
$$\underline{\varepsilon} \mapsto e(\underline{\varepsilon}) = (a,e) \cdot (0,1) = e$$

Propriétés des projections

On notera que ces deux applications sont linéaires à l'instar d'un produit scalaire. On notera aussi les propriétés suivantes :

$$a(\underline{\varepsilon}) \leq E(\underline{\varepsilon})$$
$$e(\underline{\varepsilon}) \leq E(\underline{\varepsilon})$$

Notons également que :

$$E(\underline{\varepsilon}) = (a,e) \cdot (1,1) = a + e$$

[313] Re($\underline{z}$) = partie réelle du nombre complexe $\underline{z}$
[314] Im($\underline{z}$) = partie imaginaire du nombre complexe $\underline{z}$

Premiers exemples

La chaleur dans E

A titre d'exemple, pour une quantité de chaleur Q de température T échangeant avec un milieu de température T_0, nous aurons alors :

$$\underline{\varepsilon} = Q \cdot \left(\frac{T_0}{T}, 1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad \underline{\varepsilon} = Q \cdot \left(\frac{T_0}{T}, 1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

Nous vérifions bien que :

$$E(\underline{\varepsilon}) = Q\frac{T_0}{T} + Q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = Q$$

$$E(\underline{\varepsilon}) = Q\frac{T_0}{T} + Q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = Q$$

La composante exergique correspond au rendement maximum d'un cycle de Carnot.

Energie solaire

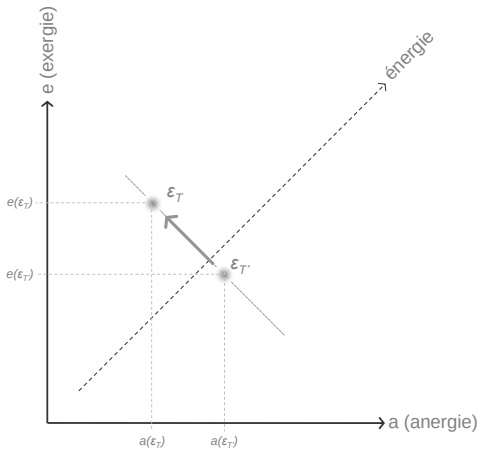
Pour l'énergie solaire frappant la surface terrestre[315] :

$$\underline{\varepsilon}_{soleil} \cong E(\underline{\varepsilon}_{soleil}) \cdot \left(\frac{3}{100}, \frac{97}{100} \right)$$

Electricité

Pour l'électricité, le vecteur s'exprime de la façon suivante :

$$\underline{\varepsilon}_{elec} \cong E(\underline{\varepsilon}_{elec}) \cdot (0,1)$$



Pour une même quantité de chaleur, si la température augmente, le point d'énergie se déplace le long d'une iso-énergie en augmentant progressivement le contenu exergique.

Opérateurs sur E

Opérateurs linéaires d'évolution

Soit l'opérateur linéaire *f* agissant de E dans E.

$$f : \underline{\varepsilon} \mapsto \underline{\varepsilon}' = f(\underline{\varepsilon})$$

Si *f* est un opérateur d'évolution de la donnée énergétique, cela suppose de préserver sa norme –respect de la conservation d'énergie- ainsi qu'une dégradation de sa valeur exergique.

Traduit dans notre formalisme, ceci entraîne les égalités et inégalités suivantes :

$$E[f(\underline{\varepsilon})] = E[\underline{\varepsilon}]$$

$$e[f(\underline{\varepsilon})] \leq e[\underline{\varepsilon}]$$

Groupe matriciel des opérateurs sur E

On vérifie le respect de la composition entre deux applications *f* et *g*.

$$E[f \circ g(\underline{\varepsilon})] = E[g(\underline{\varepsilon})] = E[\underline{\varepsilon}]$$

$$e[f \circ g(\underline{\varepsilon})] \leq e[g(\underline{\varepsilon})] \leq e[\underline{\varepsilon}]$$

Par contre l'addition n'est pas préservée.

[315] Référence à rappeler

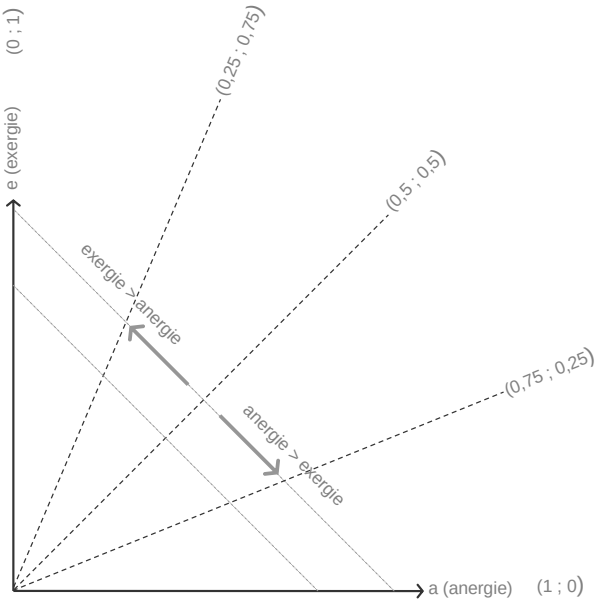
Thermodynamique dans l'espace E

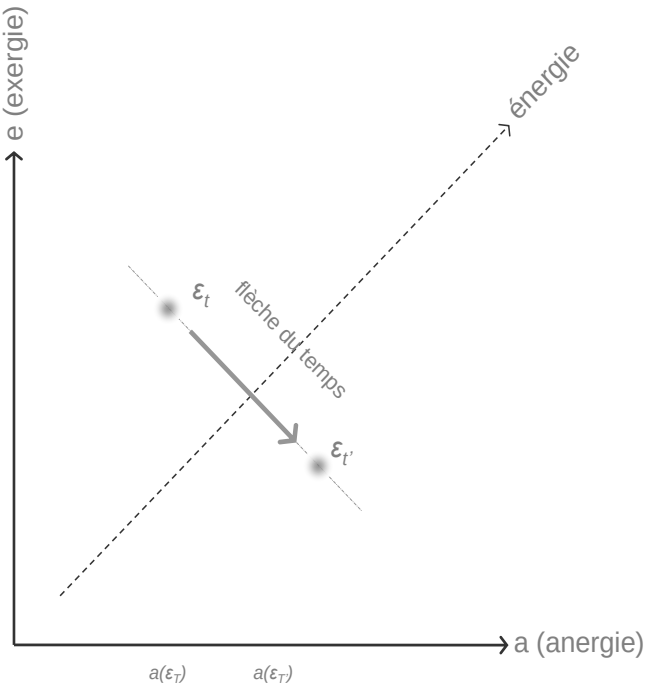
Premier principe

Le premier principe préserve la norme.

Deuxième principe

Le deuxième principe opère un transfert de l'exergie vers l'anergie au cours du temps.





Les radiales de proportion relative entre exergie et anergie. Le premier principe suppose de se déplacer sur une droite iso-énergie tandis que la flèche du temps suppose un déplacement descendant.

Algèbre de la géonergie

L'espace T

Notation « bra-khet »

La notation *bra-ket* a été introduite par Paul Dirac pour faciliter l'écriture des équations de la mécanique quantique, mais aussi pour souligner l'aspect vectoriel de l'objet représentant un état quantique.

Le nom provient d'un jeu de mots avec le terme anglais *bracket* qui signifie « crochet de parenthèse », en l'occurrence « » et « » respectivement appelés « *bra* » et « *ket* » (un peu à l'image de bâbord et de tribord). Cette notation est depuis reprise dans l'étude mathématique de l'algèbre des opérateurs, dont le champ d'application est plus large.

Vecteur en notation « ket »

Au sein d'une partition de n agents, nous représenterons un état du système par ces différentes composantes par agent. Un état $\underline{U}$ du système sera donc décrit de la façon suivante :

$$\left|\underline{U}\right\rangle = \begin{bmatrix} \underline{u}_1 \\ \dots \\ \underline{u}_k \\ \dots \\ \underline{u}_n \end{bmatrix} == \begin{bmatrix} \left(a(\underline{u}_1), e(\underline{u}_1)\right) \\ \dots \\ \left(a(\underline{u}_k), e(\underline{u}_k)\right) \\ \dots \\ \left(a(\underline{u}_n), e(\underline{u}_n)\right) \end{bmatrix}$$

Sauf mention contraire, les composantes seront des données de l'espace E et dont la norme sera homogène à une quantité d'énergie ou à un flux surfacique d'énergie à un flux surfacique de puissance.

Par extension, des vecteurs pourront aussi posséder des composantes dans R. Ce sera notamment le cas pour la base de la partition. Dans ce cas-là, les composantes du vecteur ne seront pas soulignées.

On en déduit que la quantité de scalaires contenue dans un vecteur d'état du système comprendra dès lors $2n$ paramètres.

Vecteur en notation « bra »

De façon transposée, le même état pourra également être décrit de la façon suivante :

$$\langle \underline{U} | = [\underline{u}_1 \quad ... \quad \underline{u}_k \quad ... \quad \underline{u}_n]$$

Multiplication par un scalaire

Rappelons la loi produit qui opère dans E :

$$\boldsymbol{R}^+ \times \boldsymbol{E} \rightarrow \boldsymbol{E}$$
$$(\lambda, \underline{\varepsilon}) \mapsto \lambda \cdot \underline{\varepsilon} = \lambda \cdot (a, e) = (a, e) \cdot \lambda = (\lambda a, \lambda e)$$

Nous généralisons cette propriété de la façon suivante :

$$\boldsymbol{R}^+ \times \boldsymbol{E}^n \rightarrow \boldsymbol{E}^n$$
$$\left(\lambda, |\underline{U}\rangle\right) \mapsto \lambda \cdot |\underline{U}\rangle = |\underline{\lambda U}\rangle = \begin{bmatrix} \lambda \cdot \underline{u}_1 \\ ... \\ \lambda \cdot \underline{u}_k \\ ... \\ \lambda \cdot \underline{u}_n \end{bmatrix}$$

Produit scalaire et norme d'un vecteur

Le produit scalaire entre deux états U et V de la partition correspondra alors à :

$$\boldsymbol{E}^n \times \boldsymbol{E}^n \rightarrow \boldsymbol{R}^+$$
$$(\underline{U}, \underline{V}) \mapsto \langle \underline{U} | \underline{V} \rangle = \langle \underline{V} | \underline{U} \rangle = \sum_{k=1}^{n} \underline{u}_k \cdot \underline{v}_k$$

Avec :

$$\underline{u}_k \cdot \underline{v}_k = a(\underline{u}_k) a(\underline{v}_k) + e(\underline{u}_k) e(\underline{v}_k)$$

Notons aussi que le produit scalaire définit aussi par extension une forme linéaire pouvant opérer dans E, étant donné la loi proposée pour une multiplication par un scalaire :

$$\boldsymbol{E}^n \times \boldsymbol{R}^n \rightarrow \boldsymbol{E}$$
$$(\underline{U}, X) \mapsto \langle \underline{U} | X \rangle = \langle X | \underline{U} \rangle = \sum_{k=1}^{n} \underline{u}_k \cdot x_k$$

Nous définissons une norme de la façon suivante :

$$E(\underline{U}) = \sum_{k=1}^{n} E(\underline{u}_k)$$

Elle mesure la somme des énergies des sous-parties de la partition : elle coïncide bien avec la définition de l'énergie en tant que variables extensives. Comme dans l'espace E, nous pouvons aussi déduire que :

$$\sqrt{\langle \underline{U} | \underline{U} \rangle} \leq E(\underline{U})$$

Projection de l'état complet

Par convention, on associera le vecteur permettant la projection du système sur l'agent k à l'état du système possédant les composantes suivantes :

$$|k\rangle : \quad \begin{cases} u_k = 1 \\ u_l = 0, \forall l \neq k \end{cases}$$

Notons dans ce cas que :

$$\langle k|\underline{U}\rangle = \underline{u}_k \in E \ \langle k|\underline{U}\rangle = \underline{u}_k \in E$$

Projection de l'état anergique

Nous définissons le vecteur suivant qui permet de décrire l'état anergique de l'agent k :

$$|\underline{k}_a\rangle : \quad \underline{u}_k = (1,0) \ \underline{u}_k = (1,0) \begin{cases} \underline{u}_k = (1,0) \\ \underline{u}_l = (0,0), \forall l \neq k \end{cases} \quad \underline{u}_l = (0,0), \forall l \neq k$$

Notons que :

$$\langle \underline{k}_a|\underline{U}\rangle = a\left[\langle k|\underline{U}\rangle\right] = a(\underline{u}_k) \in R^+$$

Projection de l'état exergique

Nous définissons le vecteur suivant qui permet de décrire l'état exergique de l'agent k :

$$|\underline{k}_e\rangle : \quad \underline{u}_k = (0,1) \ \underline{u}_k = (0,1) \begin{cases} \underline{u}_k = (0,1) \\ \underline{u}_l = (0,0), \forall l \neq k \end{cases} \quad \underline{u}_l = (0,0), \forall l \neq k$$

Notons que :

$$\langle \underline{k}_e|\underline{U}\rangle = e\left[\langle k|\underline{U}\rangle\right] = e(\underline{u}_k) \in R^+$$

Projection de l'état énergétique

Enfin, pour connaître la quantité d'énergie détenue sur la composante k, nous définissons le vecteur suivant :

$$|\underline{k}_{a+e}\rangle : \quad \underline{u}_k = (1,1) \ \underline{u}_k = (1,1) \begin{cases} \underline{u}_k = (1,1) \\ \underline{u}_l = (0,0), \forall l \neq k \end{cases} \quad \underline{u}_l = (0,0), \forall l \neq k$$

Nous en déduisons aussi que :

$$\langle \underline{k}_{a+e}|\underline{U}\rangle \in R^+$$

Notons enfin que :

$$|\underline{k}_{a+e}\rangle = |\underline{k}_a\rangle + |\underline{k}_e\rangle$$
$$\langle \underline{k}_{a+e}|\underline{U}\rangle = E(\underline{u}_k)$$

Projections globales

Par convention, on associera le vecteur permettant la projection du système sur l'ensemble des composantes de la partition :

$$|1\rangle = \sum_k |k\rangle$$
$$|\underline{1}_a\rangle = \sum_k |\underline{k}_a\rangle$$
$$|\underline{1}_e\rangle = \sum_k |\underline{k}_e\rangle$$
$$|\underline{1}_{a+e}\rangle = \sum_k |\underline{k}_{a+e}\rangle$$

Description du système

Le vecteur « soleil »

Sur l'intervalle de temps T, définissons le vecteur $\underline{S}$[316], représentant la valorisation énergétique issue du soleil, au-dessus de l'aire A_k étudiée. Pour mémoire, il correspond principalement à la valorisation des gisements solaires, éoliens, hydrauliques et marins[317] :

$$\left|\underline{S}\right\rangle = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 \\ \dots \\ \underline{s}_k \\ \dots \\ \underline{s}_n \end{bmatrix}$$

Nous tirons des règles précédentes, l'identité suivante :

$$\left\langle k \middle| \underline{S} \right\rangle = \underline{s_k} = (a(\underline{s}_k); e(\underline{s}_k)) \; \left\langle k \middle| \underline{S} \right\rangle = \underline{s_k} = (a(\underline{s}_k); e(\underline{s}_k))$$

Nous noterons également le gisement incident issu du soleil :

$$\left|\underline{S}^0\right\rangle = \begin{bmatrix} \underline{s}^0{}_1 \\ \dots \\ \underline{s}^0{}_k \\ \dots \\ \underline{s}^0{}_n \end{bmatrix}$$

Nota sur l'évaluation de S^0

La constante extrasolaire est de 1360 W/m². Rapportée à la surface du globe, nous en déduisons le flux équivalent suivant 340 W/m² : il correspond au flux frappant les couches supérieures de l'atmosphère.

Notre hypothèse de définition de la partition spatiale est effectuée à l'altitude du sol naturel (plus bâti). Dans ce cas de figure, le flux moyen sur la surface du globe est alors de 169 W/m².

En première approche, nous considérons l'égalité suivante (exprimée en W/m²) :

$$\left\langle 1 \middle| \underline{S}^0 \right\rangle \cong 169 \cdot \left(\frac{3}{100}, \frac{97}{100} \right)$$

Solarisation de l'agent k

Le taux de « *solarisation* » de l'agent k pourra notamment être évalué tant du point anergique, exergique que global. A titre d'exemple, le taux global de transformation exergique issu du soleil sera donc :

$$\frac{\left\langle \underline{k}_e \middle| \underline{S} \right\rangle}{\left\langle \underline{k}_e \middle| \underline{S}^0 \right\rangle}$$

[316] Pour sky, sun ou soleil.
[317] Il prend aussi en compte l'énergie marémotrice bien que non dérivée de l'énergie solaire.

Le vecteur « géothermie »

Sur l'intervalle de temps T, nous définissons le vecteur $\underline{G}$[318], représentant la valorisation énergétique issue du sous-sol profond et notamment du flux rémanent de chaleur issue de la décomposition de fission atomique au sein du cœur terrestre.

Dans un formalisme analogue au précédent, nous désignerons alors le flux du *produit énergétique* issu du sous-sol pour l'aire étudiée $\mathcal{A}_k$ de la façon suivante :

$$\langle k|\underline{G}\rangle = \underline{g}_k = (a(\underline{g}_k); e(\underline{g}_k))$$

Nous noterons le gisement incident issu du sous-sol de la façon suivante :

$$\left|\underline{G}^0\right\rangle = \begin{bmatrix} \underline{g}^0{}_1 \\ \cdots \\ \underline{g}^0{}_k \\ \cdots \\ \underline{g}^0{}_n \end{bmatrix}$$

En première approche, nous considérons l'égalité suivante (exprimée en W/m²)[319] :

$$\left\langle 1\left|\underline{G}^0\right\rangle \cong 60.10^{-3}\cdot\left(\frac{99}{100},\frac{1}{100}\right)\right.$$

Le taux de transformation de l'anergie incidente auprès de l'agent k pourra notamment être évalué de la façon suivante :

$$\frac{\langle \underline{k}_a|\underline{G}\rangle}{\left\langle \underline{k}_a\left|\underline{G}^0\right\rangle\right.}$$

La matrice richesse-échange

Pour la même période temporelle T, on définit le transfert d'énergie de l'agent i vers l'agent j par :

$$\underline{m}_{ij} = \underline{m}_{i\to j}\ \underline{m}_{ij} = \underline{m}_{i\to j}$$

Avec :

$$\underline{m}_{ij} \in E\ \underline{m}_{ij} \in E$$

La matrice d'échange s'écrit alors de la façon suivante :

$$\left|\underline{M}\right| \equiv \begin{bmatrix} \underline{m}_{11} & .. & \underline{m}_{1k} & .. & \underline{m}_{1n} \\ .. & .. & .. & .. & .. \\ \underline{m}_{k1} & .. & \underline{m}_{kk} & .. & \underline{m}_{kn} \\ .. & .. & .. & .. & .. \\ \underline{m}_{n1} & .. & \underline{m}_{nk} & .. & \underline{m}_{nn} \end{bmatrix}$$

Transposée en notation *bra-ket*, le transfert d'énergie[320] de l'agent k vers l'agent l s'écrira donc :

$$\underline{m}_{k\to l} = \underline{m}_{kl} = \langle k|\underline{M}|l\rangle$$

Notons aussi que de façon générale, la matrice $\underline{M}$ n'a pas en général de propriétés particulières de symétrie, étant donné que la *balance énergétique* entre deux agents k et l n'a pas de raisons particulières d'être nulle.

Nous définirons la matrice transposée de la façon suivante :

$$\underline{m}^*_{kl} = \underline{m}_{lk} = \langle l|M|k\rangle = \langle k|M^*|l\rangle$$

A titre d'exemple, les transferts entre deux agents peuvent notamment consister en :

- Transfert de marchandises et donc d'énergies incorporées,
- Transfert d'organismes vivants, y compris un transfert de population sur la période T[321]
- D'électricité,
- De carburants fossiles,
- De chaleur ou de froid, notamment via les réseaux thermiques,
- D'alimentation,
- …

[318] Pour *ground* ou géothermie.
[319] Pour une valeur moyenne de la chaleur d'origine interne égale à 0.06 W/m²
[320] Au sens de vecteur de l'espace E
[321] Ce point suppose d'évaluer l'énergie incorporée d'organismes vivants dont l'homme !...

Le vecteur-stock

Les termes diagonaux de la matrice $\underline{M}$ correspondent formellement à l'échange énergétique de l'agent *k* sur lui-même. Nous considérerons qu'il correspond à un flux de stock. Nous essaierons dans la suite d'évaluer l'évolution de ce stock au cours de la période *T*.

Par simplification, et pour caractériser plus simplement l'état du stock énergétique, on écrira :

$$\underline{m}_{kk} = \underline{m}_k$$

On considère que cette quantité correspond au stock d'énergie accumulé par l'agent *k* : cela constitue son stock de richesses, une partie de ses *actifs énergétiques*. Notons enfin que sur la période *T,* nous analyserons la variation de ce stock noté :

$$\Delta \underline{m}_k \in E$$

Notons que le stock correspond à l'ensemble des actifs énergétiques disponibles au sein de l'épaisseur de la partition. A titre d'exemple, elle peut comprendre :

- Les réserves de minerai exploitables,
- Les réserves d'énergies fossiles,
- Les réserves vivantes[322],
- Les stocks de bois-énergie,
- Les stocks alimentaires,
- Les actifs d'énergie incorporée,
- L'électricité stockée[323],
- La chaleur stockée[324],
- …

Gardons également à l'esprit une condition aux limites à respecter, notamment dans le cadre de simulations projetées :

$$E(\underline{m}_k) \geq 0 \quad E(\underline{m}_k) \geq 0$$

Le vecteur-demande

Pour la même période temporelle *T*, nous définissons le vecteur suivant, représentant la demande énergétique (ou une partie de ses *charges énergétiques*) de l'agent *k*. Elle correspond à l'écriture en (anergie, exergie) de l'ensemble des besoins de la population *P* sur le territoire *A*.

Elle traduit notamment la somme des besoins :

- En chaud et en froid,
- En éclairage,
- En alimentation,
- En transport de personnes,
- En transport de marchandises,
- En besoins d'énergies incorporées

$$\langle k | \underline{D} \rangle = \underline{d}_k \in E$$

Nota important : il s'agira de ne pas confondre la densité de l'agent *k* (*d* non souligné) de la demande (*d* souligné)

Le vecteur-consommation

Pour la même période temporelle *T*, nous définissons le vecteur suivant, représentant l'énergie dissipée vers l'extérieur terrestre et dirigée vers le ciel. Elle correspond à un flux essentiellement anergique.

$$\langle k | \underline{C} \rangle = \underline{c}_k \in E$$

Cette quantité permet de mesurer l'activité de transformation énergétique de l'agent *k*.

En première approche, et en 2010, nous pourrons considérer que le vecteur-consommation globale exprimé en Watt :

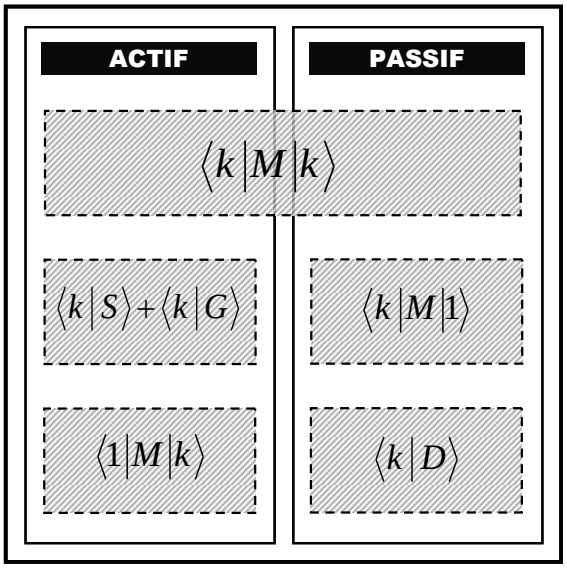
$$\langle 1 | \underline{C} \rangle \cong 2200.P.(1,0)$$

[322] Comprenant également la population moyenne de la période *T*.
[323] Par exemple dans des piles à combustible.
[324] Par exemple dans un dispositif de stockage intersaisonnier.

Eléments de comptabilité énergétique

Notations

Variation du stock	$\Delta\langle k\,\underline{M}\,k\rangle$
Offre énergétique[325]	$\langle k\,\underline{S}\rangle + \langle k\,\underline{G}\rangle$
Intrants énergétiques	$\langle 1\,\underline{M}\,k\rangle$
Sortants énergétiques	$\langle k\,\underline{M}\,1\rangle$
Demande énergétique	$\langle k\,\underline{D}\rangle$
Emissions fatales[326]	$\langle k\,\underline{C}\rangle$



Bilan énergétique comptable de l'agent k écrit dans l'espace E

Balance intérieure

Dans la suite de l'étude, nous définirons comme ci-dessous la balance entre les intrants intérieurs et la consommation par le vecteur suivant :

$$\left|\underline{B}^{\text{int}}\right\rangle = \left|\underline{S}\right\rangle + \left|\underline{G}\right\rangle - \left|\underline{D}\right\rangle$$

Ce vecteur permettra notamment d'évaluer la capacité du système à équilibre offre et demande énergétique localement en régime permanent : en effet le terme de variation du stock est absent de l'expression.

Balance extérieure

Par analogie avec la macro-économie, nous pouvons également définir la balance extérieure énergétique comme la différence entre les flux sortants et flux entrants[327].

$$\left|\underline{B}^{ext}\right\rangle = -\left|\underline{M}^{*} - \underline{M}\right|1\rangle$$

Bilan des balances

Nous en déduisons que la conservation de l'énergie peut alors s'écrire de la façon suivante[328] :

$$E\left(\Delta\left|\underline{M}\right\rangle\right) = E\left(\left|\underline{B}^{\text{int}}\right\rangle - \left|\underline{B}^{ext}\right\rangle\right)$$

[325] Ou une partie des *produits énergétiques* au sens comptable
[326] Ou une partie des *charges énergétiques* au sens comptable
[327] A l'instar d'une balance commerciale
[328] A vérifier

Produits énergétiques

Par analogie comptable, l'ensemble des intrants énergétiques susceptibles d'augmenter le résultat énergétique d'un agent est nommé *produit énergétique*. Il est donc définit par :

$$|\underline{p}\rangle = |\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle + |\underline{M}^*|1\rangle$$

Charges énergétiques

Par analogie comptable, l'ensemble des sortants énergétiques susceptibles de diminuer le résultat énergétique d'un agent est nommé *charge énergétique*. Il est donc définit par :

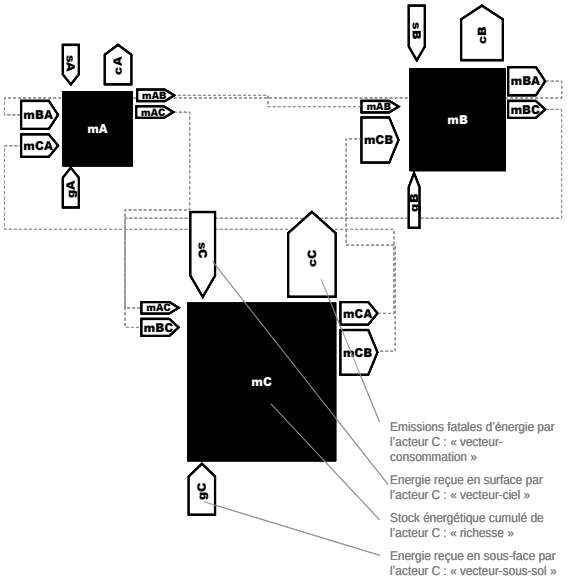
$$|\underline{c}\rangle = |\underline{M}|1\rangle + |\underline{C}\rangle$$

Bilan produits et charges

Nous en déduisons que la conservation de l'énergie peut alors s'écrire de la façon suivante :

$$E(\Delta|\underline{M}\rangle) = E(|\underline{p}\rangle - |\underline{c}\rangle)$$

Conservation de l'énergie



Rappel de l'organigramme d'échange présenté dans les [Re]présentations

Pour l'agent *k*, la variation de son stock[329] énergétique correspond à l'écart entre la somme des flux entrants, projetés sur l'axe énergétique, et la somme des flux sortants :

$$E(\Delta \underline{m}_k) = E\left(\underline{s}_k + \underline{g}_k + \sum_{l \neq k} \underline{m}_{lk} - \sum_{l \neq k} \underline{m}_{kl} - \underline{c}_k\right)$$

De façon vectorielle, la conservation de l'énergie s'écrit donc :

$$E(\Delta|\underline{M}\rangle) = E(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle + |\underline{M}^* - \underline{M}|1\rangle - |\underline{C}\rangle)$$

[329] Nota important : cette équation de bilan pourra aussi être associé à différents périmètres. Concernant la prise en compte énergétique des flux de matière et la difficulté de modélisation de l'amortissement de l'énergie incorporée (ou énergie grise), nous pourrons aussi choisir d'omettre ces quantités dans différentes applications pratiques.

Augmentation de l'entropie

Diminution de l'exergie

Le deuxième principe suppose que la qualité de l'énergie sortante a diminué. Nos pouvons donc traduire cette inégalité de la façon suivante :

$$\langle \underline{k}_e | \underline{in} \rangle \geq \langle \underline{k}_e | \underline{out} \rangle$$

Augmentation de l'anergie

A contrario, la dégradation de la qualité de l'énergie se traduit par une augmentation de l'anergie en sortie du système (ou de l'agent *k*)

$$\langle \underline{k}_a | \underline{in} \rangle \leq \langle \underline{k}_a | \underline{out} \rangle$$

Nous pouvons aussi constater que les écarts d'anergie et d'exergie en entrée-sortie seront identiques en valeur absolue du fait de la conservation de l'énergie. Celle-ci peut aussi être écrite de la façon suivante :

$$\langle \underline{k}_e | \underline{in} \rangle + \langle \underline{k}_a | \underline{in} \rangle = \langle \underline{k}_e | \underline{out} \rangle + \langle \underline{k}_a | \underline{out} \rangle$$

Traduction pour l'agent k

Il y a lieu de distinguer le rôle de source ou de puits de la variation du stock.

Dans le cas de figure, où la quantité d'exergie du stock diminue, cela signifie dès lors que le stock est un intrant. On en déduit alors l'inégalité suivante :

$$e(\Delta \underline{m}_k) < 0 \quad e(\Delta \underline{m}_k) < 0$$

$$e\left(\underline{s}_k + \underline{g}_k + \sum_{l \neq k} \underline{m}_{lk} - \Delta \underline{m}_k \right) \geq e\left(\sum_{l \neq k} \underline{m}_{kl} + \underline{c}_k \right)$$

Dans le cas contraire, si le stock d'exergie augmente, alors la variation de stock est un sortant. Nous en déduisons alors :

$$e(\Delta \underline{m}_k) \geq 0 \quad e(\Delta \underline{m}_k) \geq 0$$

$$e\left(\underline{s}_k + \underline{g}_k + \sum_{l \neq k} \underline{m}_{lk} \right) \geq e\left(\sum_{l \neq k} \underline{m}_{kl} + \underline{c}_k + \Delta \underline{m}_k \right)$$

Synthèse des lois de la thermodynamique

Synthèse

Nous pouvons donc retenir dans les deux cas l'inégalité suivante :

$$e\left(\underline{s}_k + \underline{g}_k + \sum_{l \neq k} \underline{m}_{lk} \right) \geq e\left(\sum_{l \neq k} \underline{m}_{kl} + \underline{c}_k + \Delta \underline{m}_k \right)$$

Expressions vectorielles

$$E\left(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle + |\underline{M}^*|1\rangle \right) = E\left(|\underline{C}\rangle + \Delta |\underline{M}\rangle + |\underline{M}|1\rangle \right)$$

Et l'information ?

La quantité maximale d'augmentation néguentropique de l'agent *k* sera donc nécessairement[330] :

$$I_{MAX} = e\left(\underline{s}_k + \underline{g}_k + \sum_{l \neq k} \underline{m}_{lk} \right) - e\left(\sum_{l \neq k} \underline{m}_{kl} + \underline{c}_k + \Delta \underline{m}_k \right)$$

[330] A vérifier.

Quelques enseignements

Problème inverse 1

Dans le cas d'un système à *n* agents, et si pour chaque agent nous connaissons :

- Sa capacité de conversion du vecteur-soleil,
- Sa capacité de conversion du vecteur-géothermie,
- La variation de son stock énergétique,
- La valeur de sa dissipation énergétique,

Que peut-on alors en déduire sur la nature des échanges entres les *n* agents ?

Robustesse du réseau d'agents énergétiques

De fait, la matrice M comprend n^2 termes, éléments de *E*. Les *n* termes diagonaux sont connus : ils correspondent aux variations de stock énergétique de chaque agent. On en déduit que n^2-n termes sont inconnus, et que chaque terme non diagonal comportent deux composantes.

Le jeu d'égalité (pour la conservation d'énergie) entraîne *n* relation. On en déduit que la dimension du sous-espace vectoriel est donc :

$$2\left(n^2-n\right)-n=2n^2-3n$$

Cela montre que plus le nombre d'agents augmente (ou le nombre de points dans le réseau d'échange) plus les possibilités d'échanges pour une situation donnée de consommation, de production et de variation du stock augmente quadratiquement.

Au sein de sous-espace $n+2(n^2-n)=2n^2-n$ inégalités limiteront l'espace des possibles.

Problème inverse 2

Dans le cas d'un système à *n* agents, et si pour chaque agent nous connaissons :

- Sa capacité de conversion du vecteur-ciel,
- Sa capacité de conversion du vecteur-sous-sol,
- La valeur de sa dissipation énergétique,

Que peut-on alors en déduire sur la nature des échanges entres les *n* agents ? Ce problème diffère du précédent car la variation du stock est ici une inconnue.

Rappelons également que dans le cadre d'une partition macroscopique de la Terre, si par exemple les membres de l'OPEP sont rassemblés au sein d'une même partition, et que cette dernière rassemble également les territoires disposant de réserves d'énergies fossiles, cela implique que la quantité de stock des autres éléments de la partition est négligeable. Nous avons alors :

$$2n^2-n$$

Définition du rendement thermodynamique

De façon classique, le rendement d'une machine thermique compare la quantité de travail produite à la chaleur consommée.

$$r = \frac{W}{Q}$$

Dans une situation de régime permanent, on considère qu'il n'y a pas de variation du capital énergétique détenue par l'agent *k*. Cela correspond à :

$$\Delta \underline{m}_k = \underline{0}$$

Dans ce cas de figure, la quantité de travail correspond à la différence entre les quantités d'exergie exportées et importées. Nous en déduisons la définition suivante du rendement thermodynamique de l'agent *k*.

$$r_k = \frac{e\left(\sum_l \underline{m}_{kl} - \underline{m}_{lk}\right)}{a(\underline{c}_k)}$$

En régime permanent, l'inégalité exergique devient :

$$e\left(\underline{s}_k + \underline{g}_k + \sum_l \underline{m}_{lk}\right) \geq e\left(\underline{c}_k + \sum_l \underline{m}_{kl}\right)$$

On en déduit alors :

$$r_k \leq \frac{e(\underline{s}_k + \underline{g}_k - \underline{c}_k)}{a(\underline{c}_k)}$$

Si l'on considère que la composante exergique de la dissipation d'énergie est négligeable devant sa composante anergique, nous en déduisons la majoration simplifiée suivante :

$$r_k \leq \frac{e(\underline{s}_k + \underline{g}_k)}{a(\underline{c}_k)}$$

On se souvient qu'à l'échelle globale, le flux géothermique est bien plus faible que le flux solaire. Dès lors, dans une très grande majorité de situation géographique[331], le rendement maximum d'un territoire sera directement corrélé au rendement moyen de conversion exergique du flux solaire.

A l'échelle globale

A l'échelle de la planète Terre, les termes matriciels d'échange disparaissent. On retient alors :

$$E(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle) = E(|\underline{C}\rangle + \Delta|\underline{M}\rangle)$$

$$e(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle) \geq e(|\underline{C}\rangle + \Delta|\underline{M}\rangle)$$

Dans la situation où la planète Terre ne puise pas dans ses réserves (ce qui était globalement le cas avant la première révolution industrielle[332]), les relations deviennent :

$$E(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle) = E(|\underline{C}\rangle) \; E(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle) = E(|\underline{C}\rangle)$$

$$e(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle) \geq e(|\underline{C}\rangle) \; e(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle) \geq e(|\underline{C}\rangle)$$

Si l'on néglige la contribution géothermique, nous en déduisons ces relations simplifiées :

$$E(|\underline{S}\rangle) \cong E(|\underline{C}\rangle) \; E(|\underline{S}\rangle) \cong E(|\underline{C}\rangle)$$

$$e(|\underline{S}\rangle) \geq e(|\underline{C}\rangle) \; e(|\underline{S}\rangle) \geq e(|\underline{C}\rangle)$$

Dans la mesure où les besoins vitaux métaboliques réclament une quantité minimale de consommation énergétique par personne, nous en déduisons trivialement que l'augmentation de la population supposait nécessairement d'accroître la captation énergétique solaire. Traduit économiquement, cela présuppose une équivalence entre la quantité de terres cultivées et la population mondiale.

[331] Hormis certaines zones où le flux géothermique est plus intense localement : pensons notamment à l'Islande.

[332] Se référer à la troisième partie pour plus de développement. Une partie d'exergie était cependant puiser dans les carrières de pierre comme dans les forêts pour la construction de bâti et naval.

Démolition sélective

Estimation de durée des travaux

Gros œuvre

Code		Désignation du composant technologique		Outils / Mécanisme	Durée (min. 2 ouvriers / travail)				Notes pour la démolition sélective	Notes pour la conception de la démolition sélective
					Durée de démontage	Durée de stockage	Durée de descente	Durée totale de traitement		
					outils légers légers à faible consommation	nettoyage / emballage / blocage	charge/transport/décharge			
1.1		Ouvrage et remplissage								
	1.1 - 07	panneaux isolants	(cloisons)	gaies, mécanisme spécialisé pour la coupe (c.a., verre hydraulique)	20 min. / ouv => mq/h=0,3 h/parlet/étage	30 min. / 3 ouv (1 palier)	20 min. / 2 ouv (1 palier)	7 h/palier= 10 ouv/mq		* 1.1.4/11.2.01 : projet de démontage et mouvement
	1.1 - 05	briques	structure extérieure		6 min. / mq => 10 ouv/font	Coupe: 1,5 min. / mq => 20 ouv/font	stockage et déconstruction: 1,25 min. / mq => 15 ouv/font	1,1 h/11,1 mq = 11 ouv/m2	Portée moyenne est (3 x) 7/ mq (12,5 ouv. => coupe+ stock et descente des morceaux de mur+ durée totale référée à 1 équipes de 2 ouvriers. = 1 ouv. mars palette 1 pic	
1.2		Construction (poutres / poteaux / dalles)								
	1.1 - 01	dalles			préparation: 4 min/ mq => 48 min/pièce	coupe: 6 min/ mq => 48 min/pièce	stockage et déconstruction: 5 min/ mq =>60 min/pièce	1,5 h/plancher(10 mq) = 10 ouv/mq	Portée moyenne est (1,5 x 10= mq (10 ouv. => coupe+ stock et descente des morceaux de plancher+Durée totale référée à 1 équipes de 2 ouvriers = 1 ouvrier chantier= 1 grue à considérer une pièce de mq (6 x m) 0 (6m 1,6 m) x kg. 2000= 1800 kg => Durée total référée à 1 équipes de 2 ouvriers = (0m = 1 17 A3)	* 1.1 01 : projet de démontage et mouvement
	1.1 - 01 b	béton armé (poteaux)	(1 pièce=) cône: 30x60		préparation: 30 min/pièce	coupe: 10 min/pièce	stockage et déconstruction: 15 minutes	1,83 h/chacun	Portée moyenne est (1 x 0,6 x 0,3)= ou 0,36 t ouv. => coupe+ stock et descente des morceaux des poteaux +Durée totale référée à 1 équipes de 2 ouvriers =1 ouvrier chantier à considérer une pièce de 0,36 m= 1000 kg ou =durée totale référée à 2 équipes de 2 ouvriers = 1 0m, = 1 17 A3)	* 1.1 01 1: projet de démontage et mouvement
	1.1 - 01 c	béton armé (poutres)	(1 pièce=) poutre 30x60		préparation: 4 min/ ml => 30 min/pièce	coupe: 6 min/ ml => 30 min/pièce	stockage et déconstruction: 5 min/ml =>5 min/pièce	1,25 h/chacun	Portée moyenne est (1 x 0,6 x 0,3)= ou 0,36 t ouv. => coupe+ stock et descente des morceaux des poutres +Durée totale référée à 1 équipes de 2 ouvriers. = 1 ouvrier chantier à considérer une pièce de 0,9 m= 1000 kg.	* 1.1 01 : projet de démontage et mouvement

CVC

Code		Désignation du composant technologique		Outils / Mécanisme	Durée (min. 2 ouvriers / travail)				Notes pour la démolition sélective	Notes pour la conception de la démolition sélective
					Durée de démontage	Durée de stockage	Durée de descente	Durée totale de traitement		
					outils légers légers à faible consommation	nettoyage / emballage / blocage	charge/transport/décharge			
3.1		Installations électriques								
	4.1 - 01	interrupteurs et prises		(clés) et machines, tournevis, marteau de démolition, chariots	1 h. minutes / 1 ouvrier (10 prises /appart)		5 minutes / chacun 1 boîtes /appart	1,4 h /appart (3 boîtes) => 4 h/appart (1 boîtes) = 10 boîtes	1 palier= 1 appart ou 10 boîtes/ éléments stockés, y compris tous les composants annexes (vis, écrous, ecrous+)	* 3.1 - 01/02: Evaluation fait pour typologie. Compte des pièces et scenicaille annexe.
	3.1 - 01	lampes		(clés) et machines, tournevis, marteau de démolition, chariots	5 minutes / chacun (6 plafonnier/appart)					
	3.1 - 02	câbles (nd de conduction => 2 à 3 câbles)		(clés) et machines, tournevis, marteau de démolition, chariots	2,5 minutes / 10ml (1/10/30ml/=> 2,5=minutes/1ml	10 minutes / 10ml (y compris la mesure et le stockage)	5 minutes / chacun (1 boîte) (2 boîtes /appart)	1,5 min/ml (1,5min/mg)= 4 min /mq.	à partir de la deuxième fois on prend la séparation des câbles de la même section et aussi la hauteur de chaque câble. Tolérance de 2 à 3 minutes.	
	3.1 - 04	alimenter fenêtre		(clés) et machines, tournevis, marteau de démolition, chariots	30 minutes / chacun	5 minutes / chacun	5 minutes / chacun	1 h /appart (40 mq) => 35 minutes/chacun 1/8mq		
3.2		Système d'eau								
	3.2 - 01	chauffage		(clés) et machines, tournevis, marteau de démolition, chariots	5 minutes / chacun	15 minutes / chacun	10 minutes / chacun	1 h /chacun		* 3.2 - 02/03: Compte et dénombrement, modalité de mouvement
	3.2 - 02	sanitaires (mur de service => fournitures et éléments)		(clés) et machines, tournevis, marteau de démolition, chariots	1 h / mq	10 minutes / mq	5 minutes / mq	0,8 h /mq =>	Nivel des éléments de la même longueur (vanga 30-50 cm)	
	3.2 - 03	tuyaux de descente	(module de 3ml)	(clés) et machines, tournevis, marteau de démolition, chariots	5 minutes / chacun	5 minutes / chacun	5 minutes / chacun	10 min /chacun => 5 min./ml	stock avec manomètre	
	3.2 - 01	radiateurs	(N° de services, salle de bains + cuisine)	(clés) et machines, tournevis, marteau de démolition, chariots	10 minutes / chacun	5 minutes / chacun	5 minutes / chacun	20 min/chacun	1 frigos. => méthode très au type	* 3.2 - 04/05: Evaluation fait pour stockage et emballage, typologie et matériau. Compte des pièces et accessoires.
	3.2 - 04	sanitaires	(physiques)	(clés) et machines, tournevis, marteau de démolition, chariots	15 minutes / chacun	10 minutes / chacun	5 minutes / chacun	30 minutes / chacun. => démontage inspir vis M5/M3. =1/30 à 10 vis d'accrochage/pièce	pour le placards => bâtons tenue x 1	
3.3		Air chauffage								
	3.3 - 01	contrôle de fumée	(module de 3ml)	(clés) et machines, tournevis, marteau de démolition, chariots	8 minutes / chacun	5 minutes / chacun	2minutes / chacun	15 min /cad => 5 min./ml	stock avec manomètre	
	3.3 - 02	sanitaires	(nd de vent) => fourniture et éléments	-	12 min / ml	5 min / ml	4 min / ml	24 min /ml => 20 minutes/ 0,3ml/mq	Nivel des éléments de la même longueur (vanga 30-80 cm)	
	3.3 - 03	radiateurs / chauffage / chaudières	(2 pièce)	-	8 minutes / chacun	5 minutes / chacun	5 minutes / chacun	1 h/palier => 16 pièce/palier		* 3.3 - 04: Evaluation fait pour type et métallique, typologie et matériau. Compte des pièces et accessoires.
	3.3 - 04	groupes de contrôle, compteur, plancher) (nd chauf.) (2 pce)		-	Installation des travaux syst. d'eau / chauf.			4h /app	avec démontage des colonn. Durée totale référée à 1 équipes de 2 ouvriers = un mécanicien	
3.4		Système d'ascenseur								
	3.4 - 02	télécabines		grues, mécanisme spécialisé				8h /chacun	avec démontage des colonn. Durée totale référée à 1 équipes de 2 ouvriers = un mécanicien	* 3.4 - 02/03: projet de démontage et mouvement
	3.4 - 03	boîte électrique		-						

Menuiseries

Code		Désignation du composant technologique	Outils / Mécanisme	Durée (min. 2 ouvriers / travail)				Notes pour la déroulation sélective	Notes pour la conception de la déroulation sélective
				Durée de démontage	Durée de stockage	Durée de descente	Durée totale de traitement		
				outils légers légers à faible consommation	nettoyage / emballage / blocage	charge/transport/décharge			
2.1		Portes et fenêtres							
		Portes intérieures (en vrac en vrac)	tournevis, perceuses, marteaux de démolition, chariots				45 minutes/porte (25+20 démont)		
	2.1.-01	Bloment en bois	tournevis, perceuses, marteaux de démolition, chariots	10 minutes chacun	2 minutes chacun	3 minutes chacun	5 portes/appart => 75 minutes	15/vacc. (5 portes) => descente individuelle de chaque porte avec minuterie	Evaluation fait pour typologie et dimension, état pièce, possibilité de stockage et désassemblage à plat d'entre. Compte des pièces et eventuelle emballage.
	2.1.-02	Ouvrant en bois	tournevis, perceuses, marteaux de démolition, chariots	2 minutes chacun	3 minutes chacun	3 minutes chacun	6 portes /appart => 30 minutes		
	2.1.-03	Chambres et serrures groupe	tournevis, perceuses, marteaux de démolition, chariots	2 minutes chacun	5 minutes chacun	5 minutes chacun	12 minutes chacun => 60 minutes		
	2.1.-04	Verre	compresseur, chariots	35 minutes / 1.5mq (1/8 palle)	15 minutes / 3.5 mq (1/8 palle)	30 minutes / 10 mq (1 palle)	3.5 tripalle= 14 heures	1 plaques de verre (2*120*200cm = 4cm épaisseur annuelle) = cm 100temps => mq 3.5*8 (laquelle palle) = mq 28 (mq/8/palle); fg 1500. Durée totale référée à 2 equipes de 2 ouvriers	
2.2		Portes et fenêtres extérieures (métalliques)	tournevis, perceuses, marteaux de démolition, chariots				60 minutes/chacun (moyenne)		
	2.2.-01	Cadre métal	tournevis, perceuses, marteaux de démolition, chariots	15 minutes / chacun	2 minutes / chacun	3 minutes / chacun	5 portes /appart => 1.5 h/appt = 20 minutes/chacun	1.5h/appart (5 portes) => descente individuelle de chaque dormant avec minuterie	Evaluation fait pour typologie et dimension, état pièce, possibilité de stockage et désassemblage à plat d'entre. Compte pièces et eventuelle emballage.
	2.2.-02	Dormant en aluminium	tournevis, perceuses, marteaux de démolition, chariots	12 minutes / chacun	2 minutes / chacun	3 minutes / chacun	6 portes /appart => 35 minutes	2h/appart (5 portes) => descente individuelle de chaque dormant avec minuterie	
	2.2.-03	Ouvrant en aluminium	tournevis, perceuses, marteaux de démolition, chariots	2 minutes / chacun	5 minutes / chacun	5 minutes / chacun	5 portes /appart => 45 minutes		
2.3		Appuis de fenêtre (en particulier en marbre ou en pierre)	tournevis, perceuses, marteaux de démolition, chariots	15 minutes / chacun	10 minutes / chacun	10 minutes / chacun	3 h /palle (12 pièce)!!! => 35 minutes/chacun	1 palle!= 12 pièces (= metal) descente facilement, car il sera déjà démonté le sable, puis une partie de la paroi, et stockées sur des palettes à chaque étage.	
2.4		Portes coulissantes	tournevis, perceuses, marteaux de démolition, chariots				15 minutes/mq de porte		
2.5		Vitrerie	tournevis, perceuses, marteaux de démolition, chariots	1 minutes/chacun (1/8 palle)	3 minutes/chacun (1/8 palle)	15 minutes/chacun (1/8 palle)	1.2 h /palle => 10 mq/h	1 palle= 13.5mq	
2.6		Balcondoor	tournevis, perceuses, marteaux de démolition, chariots				40 minutes/mq		
	2.1.-01	Vitre	tournevis, perceuses, marteaux de démolition, chariots	1 minutes / 3.5mq (1/8 palle)	10 minutes / 3.5 mq (1/8 palle)	30 minutes / 10 mq (1 palle)	1.25 h/1 palle	3 plaques de verre (2x120x180cm = 4cm épaisseur annuelle) = cm 100temps => mq 3.5 x 8 (laquelle palle) = mq 28 (mq/8/palle); fg 1500. Durée totale référée à 2 équipes de 2 ouvriers	Evaluation fait pour stockage et désassemblage, descente, typologie, dimension, état du matériel
	2.1.-01	Montants métalliques (1 rangée)	tournevis, perceuses, marteaux de démolition, chariots	15 minutes / chacun	5 minutes / chacun	30 minutes / chacun	15 minutes/chacun => 1h/ch./mq	opération de démontage et stock fait à chaque étage=> Durée totale référée à 2 equipes de 2 ouvriers	

Sanitaires

Code		Désignation du composant technologique	Outils / Mécanisme	Durée (min. 2 ouvriers / travail)				Notes pour la déroulation sélective	Notes pour la conception de la déroulation sélective
				Durée de démontage	Durée de stockage	Durée de descente	Durée totale de traitement		
				outils légers légers à faible consommation	nettoyage / emballage / blocage	charge/transport/décharge			
2.8		Sanitaires							
	2.8.-01	Lavabo	clés de types différents, tournevis, marteau, pied et chariot démonteur, clé à pipe,	10 minutes chacun	5 minutes chacun	5 minutes chacun	20 minutes chacun	méthode de stockage alternative au pallet (crochets, cordes, ect.)= 1h/appart (1 pièces/app.)	Evaluation fait pour stockage et emballage, typologie et matériau. Compte des pièces et accessoires
	2.8.-02	Receveur de douche	clés de types différents, tournevis, chariots, clé à pipe,	25 minutes chacun	5 minutes chacun	10 minutes / 0.5 pallet	2 heures chacun (0.5 pallet)	1 pallet= max 10 pièces (0.5 pallet /étage); temps référé à un étage	
	2.8.-03	wc	clés de types différents, tournevis, chariots, clé à pipe,	30 minutes chacun	5 minutes chacun	5 minutes chacun	25 minutes chacun	méthode de stockage alternative au pallet (crochets, cordes, ect.)= 1h/appart (1 pièces/app.)	

Sols et revêtements

Code		Désignation du composant technologique		Outils / Mécanisme	Durée (min. 2 ouvriers / travail)				Notes pour la déconstruction sélective	Notes pour la conception de la déconstruction sélective
					Durée de démontage	Durée de stockage	Durée de descente	Durée totale de traitement		
					outils légers légers à faible consommation	nettoyage / emballage / stockage	charge/transport/déchargement			
1.3		Planchers - Revêtements								
	1.3.10	Planchers		Tournevis, perceuses, chariots	5 minutes / m²	0.5 minutes / m²	0.5 minutes / m²	5 minutes/m² + 5 minutes/m²	1 palette (longueur moyen 4 pas appart)=> n° 1/appart*60 min=> int 160=> inc 160/9.6 (surface palette)= 16-17 couches.	
	1.3.20	Couche de revêtement de sol								
			Moquette	Tournevis, perceuses, chariots	2 minutes / m² => m²/h = 30/2 = 15/palette(300m²)	15 minutes / m² (1palette)	20 minutes / m² (1palette)	1.2 h/palette= 3 minutes/m² (depuis 16ème étage= 0.2*4étage => * 0.8 au 16ème étage)* 0.8 au 16ème étage)	1 palette, (poid= 4g 2.5/m²=> 300 m² x 2.5 = 150 kg. . Durée totale référée à 3 equipes de 2 ouvriers.	
			Lé amiante	Broyeurs de diamant, chariots	5 minutes / m² => m²/2.5 = 2 h/palette (300m²)	15 minutes / m² (1palette)	15 minutes / m² (1palette)	1 h/palette= 5 minutes/m²	0.9m² x 210cm= 1 m² = 1 Full palier (épaisseur 3cm)=> 30 couches*0.9= m² 27. Durée totale référée à 3 equipes de 2 ouvriers	
			Linoléum / PVC / parquet	machine de suppression de la gomme, broyeurs de diamant, chariots	2 minutes / m² => m²/30 h= 30/palier (600m²)	15 minutes / m² (1palette)	10 minutes/ m² (1palette)	1.2 h/palier= 1 minutes/m²	1 palier poid= 1800kg/m², épaisseur 1cm=> 100 m²*0.01*1800= kg 1800. Durée totale référée à 2 equipes de 1 ouvriers	
			marbre	scies, broyeurs de diamant, chariots	10 minutes / m² => 6m²/h =1 h/palier(30m²)	15 minutes / 0.5 m² (1 palier)	15 minutes / 0.5 m² (1 palier)	3 h/palier= 12 minutes/m²	0.9m² x 60cm= 0.54 m² = 1 Full palier 1300kg (épaisseur moyenne 4cm)=> 12 couches*0.9= m² 10 => Durée totale référée à 2 equipes de 1 ouvriers. Dec = 1 h 40.	
1.4		Sols - Revêtements								
	1.4.10	Toit en pente								
			parmeure de tôle/a	scies, broyeurs de diamant, chariots	2.5 minutes / m² => m² 24-30/h	1 minutes / m² => m² 24-30/0.25h	1 minutes / m² => m² 24-30/0.25h	1.1 h/10 m² = 1 minutes /m²	1.2m²*5.0 min 6m²= 1 charge épaisseur 15cm). Durée totale référée à 2 equipes de 2 ouvriers	Evaluation fait état des pièces, possibilité et modalité de stockage, tailles modulos/découpe unique.
			tuiles	scies, broyeurs de diamant, chariots	2 minutes / m² => 15 m²/h/palier	15 minutes / 10 m² => 45minutes (1 palier)	10 minutes / 10 m² => 30m²/1 palier	1.25h/palier= 2.5 minutes /m² (depuis 5ème étage= 0.1*4étage => * 0.8 au 4ème étage)* 0.8 au 5ème étage)	n° 10 x 25 (tuiles en moyenne)/m² = 400/0.5 h= m² 35 => 1 palier => kg. /100m². Durée totale référée à 2 equipes de 2 ouvriers	

ACV par lots

Gros œuvre

Maçonneries

électricité	Engins	Puissance (kW)	Temps d'utilisation (en min)	Énergie
	Visseuse	0,015		0
	Perceuse	0,05	3000	2,5
	Marteau piqueur	1,3	3000	65
	Plaque diamantée	1,8	17400	522
	Scie	0,5	0	0
	Grue	25	17400	7250
	Chariot élévateur (Treuil)	0,7	17400	203
	Trans palette (élévateurs à fourche)	0	17400	0
			Total	8042,5

Impacts	Unités	
resources - depletion of abiotic resources	kg antimony-Eq	399,036139
acidification potential - generic	kg SO2-Eq	583,404911
eutrophication potential - generic	kg PO4-Eq	98,8060418
climate change - GWP 100a	kg CO2-Eq	60453,9565
land use - competition	m2a	205,941406
ecosystem quality - land occupation	points	60,9611551
urban land occupation - ULOP	m2a	132,107459
natural land transformation - NLTP	m2	29,7906051
human toxicity - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	35947,9028
terrestrial ecotoxicity - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	6,47210647

Diesel	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie	Litre
	Visseuse	0	0	0	0
	Perceuse	0	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0	0
	Plaque diamantée	0	0	0	0
	Scie	0	0	0	0
	Grue	35	17400	366212	10150
	Chariot élévateur	0	0	0	0
	Trans palette	27	17400	282506,4	7830
			Total	648718,4	17980

Eau	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie
	Visseuse	0	0	0
	Perceuse	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0
	Plaque diamantée	40	17400	11600
	Scie	0	0	0
	Grue	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0
	Trans palette	0	0	0
			Total	11600

CVC

Installation

électricité	Engins	Puissance (kW)	Temps d'utilisation (en min)	Énergie
	Visseuse	0,015		0
	Perceuse	0,05	9960	8,3
	Marteau piqueur	1,3	9960	215,8
	Plaque diamantée	1,8	0	0
	Scie	0,5	0	0
	Grue	25	0	0
	Chariot élévateur (Treuil)	0,7	9960	116,2
	Trans palette (élévateurs à fourche)	0	3900	0
			Total	340,3

Impacts	Unités	
resources - depletion of abiotic resources	kg antimony-Eq	38,6756083
acidification potential - generic	kg SO2-Eq	56,7127577
eutrophication potential - generic	kg PO4-Eq	9,62043274
climate change - GWP 100a	kg CO2-Eq	5859,39883
land use - competition	m2a	18,9497351
ecosystem quality - land occupation	points	5,80382455
urban land occupation - ULOP	m2a	11,9112489
natural land transformation - NLTP	m2	2,88587012
human toxicity - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	3464,55822
terrestrial ecotoxicity - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	0,61388451

Diesel	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie	Litre
	Visseuse	0	0	0	0
	Perceuse	0	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0	0
	Plaque diamantée	0	0	0	0
	Scie	0	0	0	0
	Grue	35	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0	0
	Trans palette	27	3900	63320,4	1755
			Total	63320,4	1755

eau	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie
	Visseuse	0	0	0
	Perceuse	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0
	Plaque diamantée	40	0	0
	Scie	0	0	0
	Grue	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0
	Trans palette	0	0	0
			Total	0

Menuiseries

Menuiserie

électricité	Engins	Puissance (kW)	Temps d'utilisation (en min)	Énergie
	Visseuse	0,015	12060	3,015
	Perceuse	0,05	12060	10,05
	Marteau piqueur	1,3	1200	26
	Plaque diamantée	1,8	1200	36
	Scie	0,5	0	0
	Grue	25	0	0
	Chariot élévateur (Treuil)	0,7	6600	77
	Trans palette (élévateurs à fourche)	0	12060	0
			Total	152,065

Impacts	Unités	
resources - depletion of abiotic resources	kg antimony-Eq	121,414947
acidification potential - generic	kg SO2-Eq	178,384922
eutrophication potential - generic	kg PO4-Eq	30,2921949
climate change - GWP 100a	kg CO2-Eq	18394,5989
land use - competition	m2a	57,4674655
ecosystem quality - land occupation	points	18,0042083
urban land occupation - ULOP	m2a	35,5662397
natural land transformation - NLTP	m2	9,05642556
human toxicity - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	10835,1796
terrestrial ecotoxicity - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	1,89941474

Diesel	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie	Litre
	Visseuse	0	0	0	0
	Perceuse	0	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0	0
	Plaque diamantée	0	0	0	0
	Scie	0	0	0	0
	Grue	35	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0	0
	Trans palette	27	12300	199702,8	5535
			Total	199702,8	5535

eau	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie
	Visseuse	0	0	0
	Perceuse	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0
	Plaque diamantée	40	20	13,3333333
	Scie	0	0	0
	Grue	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0
	Trans palette	0	0	0
			Total	13,3333333

Sanitaires

Sanitaires

électricité	Engins	Puissance (kW)	Temps d'utilisation (en min)	Énergie
	Visseuse	0,015	0	0
	Perceuse	0,05	0	0
	Marteau piqueur	1,3	1200	26
	Plaque diamantée	1,8	0	0
	Scie	0,5	0	0
	Grue	25	0	0
	Chariot élévateur (Treuil)	0,7	5400	63
	Trans palette (élévateurs à fourche)	0	10860	0
			Total	89

Impacts	Unités	
resources - depletion of abiotic resources	kg antimony-Eq	107,172876
acidification potential - generic	kg SO2-Eq	157,477311
eutrophication potential - generic	kg PO4-Eq	26,7433742
climate change - GWP 100a	kg CO2-Eq	16236,9024
land use - competition	m2a	50,6262322
ecosystem quality - land occupation	points	15,8816329
urban land occupation - ULOP	m2a	31,3039209
natural land transformation - NLTP	m2	7,99394041
human toxicity - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	9562,17383
terrestrial ecotoxicity - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	1,67524033

Diesel	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie	Litre
	Visseuse	0	0	0	0
	Perceuse	0	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0	0
	Plaque diamantée	0	0	0	0
	Scie	0	0	0	0
	Grue	35	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0	0
	Trans palette	27	10860	176322,96	4887
			Total	176322,96	4887

eau	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie
	Visseuse	0	0	0
	Perceuse	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0
	Plaque diamantée	0	20	0
	Scie	0	0	0
	Grue	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0
	Trans palette	0	0	0
			Total	0

Sols et revêtements

Revêtements

électricité	Engins	Puissance (kW)	Temps d'utilisation (en min)	Énergie
	Visseuse	0,015		0
	Perceuse	0,05	12300	10,25
	Marteau piqueur	1,3	12300	266,5
	Plaque diamantée	1,8	5820	174,6
	Scie	0,5	0	0
	Grue	25	0	0
	Chariot élévateur (Treuil)	0,7	6600	77
	Trans palette (élévateurs à fourche)	0	12300	0
			Total	528,35

Impacts	Unités	
resources - depletion of abiotic resources	kg antimony-Eq	121,652637
acidification potential - generic	kg SO2-Eq	178,585585
eutrophication potential - generic	kg PO4-Eq	30,3127381
climate change - GWP 100a	kg CO2-Eq	18430,5701
land use - competition	m2a	58,5517895
ecosystem quality - land occupation	points	18,1322335
urban land occupation - ULOP	m2a	36,4444964
natural land transformation - NLTP	m2	9,0753534
human toxicity - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	10872,8502
terrestrial ecotoxicity - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	1,91487075

Diesel	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie	Litre
	Visseuse	0	0	0	0
	Perceuse	0	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0	0
	Plaque diamantée	0	0	0	0
	Scie	0	0	0	0
	Grue	35	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0	0
	Trans palette	27	12300	199702,8	5535
			Total	199702,8	5535

eau	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie
	Visseuse	0	0	0
	Perceuse	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0
	Plaque diamantée	40	5820	3880
	Scie	0	0	0
	Grue	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0
	Trans palette	0	0	0
			Total	3880

Compléments pour les Métamorphoses

Trajectoires de solarisation équilibrées

Méthodologie et cheminement de la recherche

L'objectif de cette partie de la recherche est de proposer un remembrement des régions françaises basé sur la recherche d'une adéquation entre offre et demande énergétique.

Afin d'effectuer ce redécoupage du territoire français, deux types d'approches différentes ont été mis en place : utilisation de données ponctuelles, carroyées ou issues de simplification géographiques, et recours direct aux limites administratives existantes.

Automates cellulaires et diagrammes de Voronoï

Un carroyage permet un traitement de données spatiales simplifié, du fait de la régularité des relations de voisinage notamment. Il sera donc utilisé par notre premier algorithme de recherche de solutions, un automate cellulaire à critère de transition multiple, construisant les régions de proche en proche à partir de cellules d'initialisation, dans une approche purement bottom – up.

Notre deuxième algorithme utilise lui une approche top – down, lui donnant la capacité de travailler aussi bien avec des données carroyées que des données ponctuelles non organisées dans une grille : un diagramme de Voronoï vient se superposer à elles, et un algorithme génétique optimise les paramètres libres à la recherche d'un découpage optimum.

Evolution de l'automate cellulaire pour deux régions, à N = 100, 1000 et 10000 itérations

Les résultats obtenus par convergence sont mitigés, les problèmes allant de l'obtention de formes peu réalistes pour les régions, devenant discontinues ou de tailles relatives disproportionnées, à des blocages autour de situations sous-optimales.

L'ajout de critères de respect de conditions particulières est possible, telles que la minimisation du moment d'inertie en terme de population (pour garantir une certaine compacité des régions formées) ou la recherche d'une convergence vers une taille fixée (pour éviter l'explosion de taille ou la disparition des régions).

Ces contraintes s'ajoutent cependant au prix d'une forte dégradation de la performance de l'algorithme pour ce qui est de son objectif initial, la réduction des écarts entres les ratios.

La perte d'information ayant lieu lors du carroyage des données ou de la simplification des entités territoriales à leur centroïdes s'est révélée préjudiciable à la pertinence des résultats produits : les algorithmes ne voient pas de problème à découper les agglomérations ou à produire des formes peu réalistes pour des régions.

Evolution du diagramme de Voronoï à N = 5, 10 et 20 itérations

Optimisations « administratives »

La dernière méthode consiste donc à partir des limites administratives existantes, plus dans la perspective de leur redistribution entre les différentes régions que dans l'objectif d'une remise à plat complète du découpage du territoire français.

Un algorithme glouton est mis ici en place pour évaluer la succession optimale de transactions entre les régions pour la recherche de solutions, venant appuyer l'utilisateur de manière interactive lors de sa réattribution des départements aux régions.

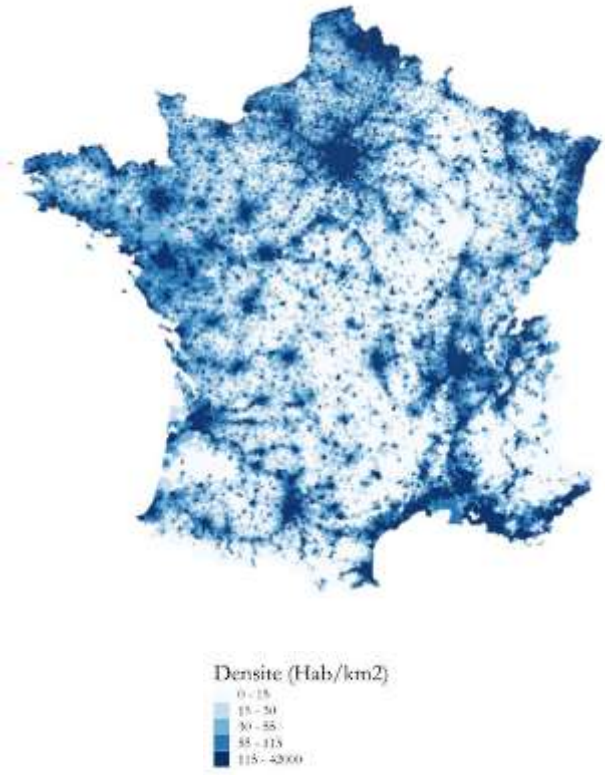
En combinant la capacité de calcul de l'algorithme et la capacité de l'utilisateur à intégrer de multiples facteurs à son analyse, tels que la forme, la taille, ou encore la viabilité politique des régions, les résultats obtenus deviennent alors plus satisfaisants.

Données et hypothèses

Les données géographiques utilisées sont issues de la base GEOFLA de l'IGN[333], contenant la géométrie et les informations administratives des cantons (département et région de rattachement, ainsi que population et superficie).

A l'aide du logiciel SIG open source QGIS, cette base est croisée avec la carte de l'irradiation moyenne annuelle fournie par le projet PVGIS du Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne[334] : chaque canton se voit attribuer une irradiation moyenne annuelle, avec laquelle est calculée l'offre potentielle solaire.

Evolution de l'optimisation administrative à N = 5, 10 et 20 itérations

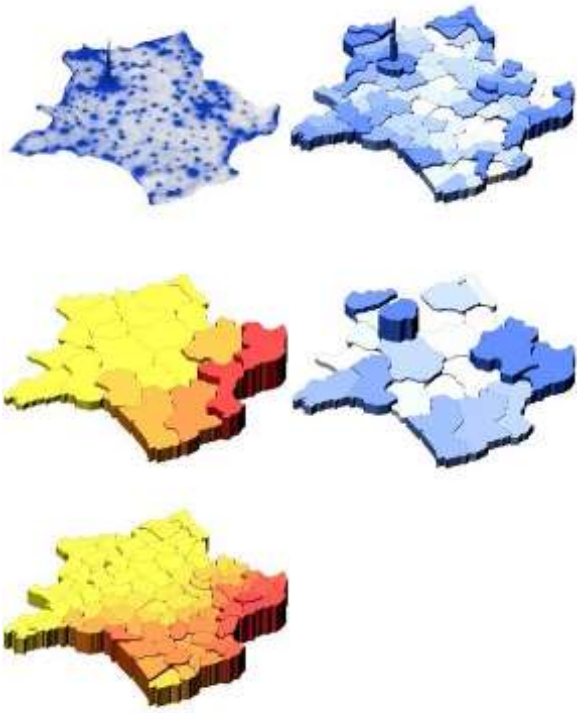


[333] http://professionnels.ign.fr/geofla
[334] (http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/

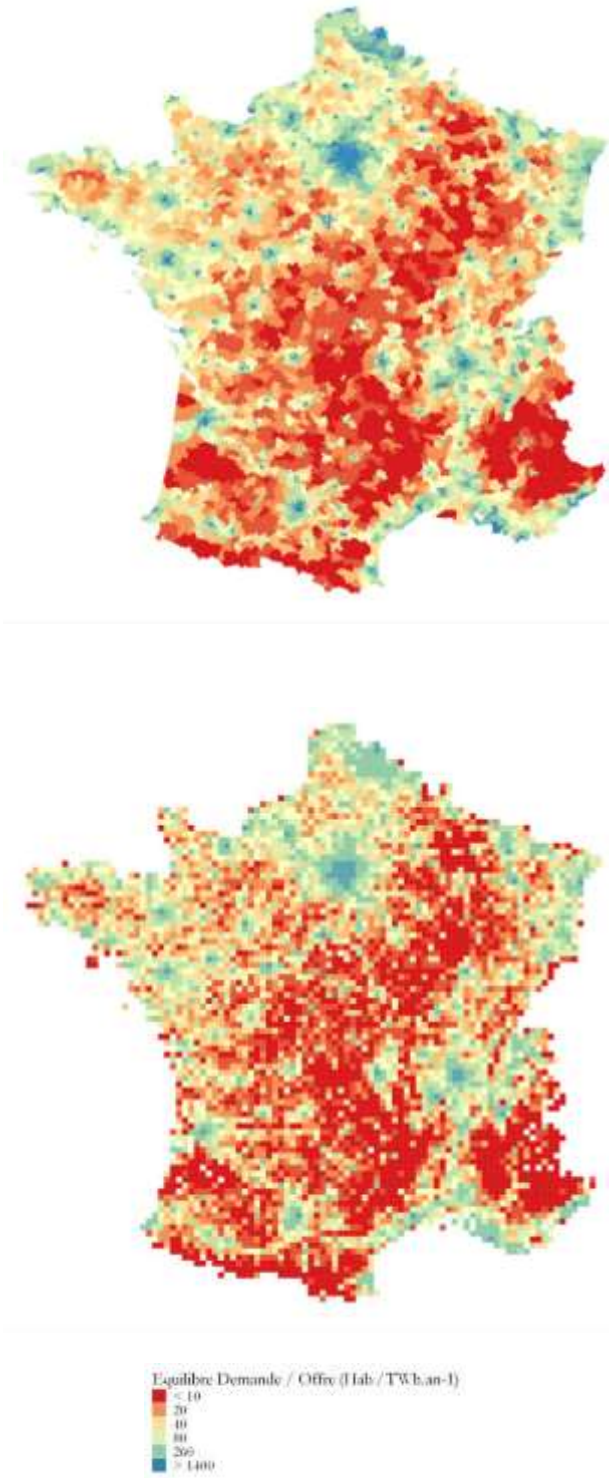
Le choix de l'échelle du canton est issu du compromis entre la précision du maillage des données d'irradiation et la taille des entités administratives, dont dépendra la qualité de la jointure spatiale effectuée. Les données sont ensuite agrégées à l'échelle des départements, pour être traitées par l'algorithme d'optimisation "administrative". Pour les deux premiers algorithmes, qui prennent pour entrées des données ponctuelles ordonnées sous forme de grille, un re-carroyage, est effectué sur les données de population de la base GEOFLA, et les données d'irradiation PVGIS.

Nous faisons dans un premier temps l'hypothèse que la consommation d'énergie est proportionnelle à la population des territoires : il s'agit d'une forte approximation, mais qui permet de travailler directement avec les données robustes (éventuellement historiques et prospectives) de la démographie française fournies par l'INSEE.

L'offre correspond à la totalité de l'énergie solaire interceptée par la surface, qui correspondrait à la couverture de la totalité du territoire de panneaux fonctionnant à un rendement de 100%. Les aspects de distribution de l'énergie ne sont pas pris en compte ici. L'équilibre étudié, caractérisé par le ratio demande sur offre correspond donc ici plus à un nombre d'habitant par quantité d'énergie solaire disponible sur un territoire donné, à une époque donnée, qu'à un réel équilibre offre / demande.



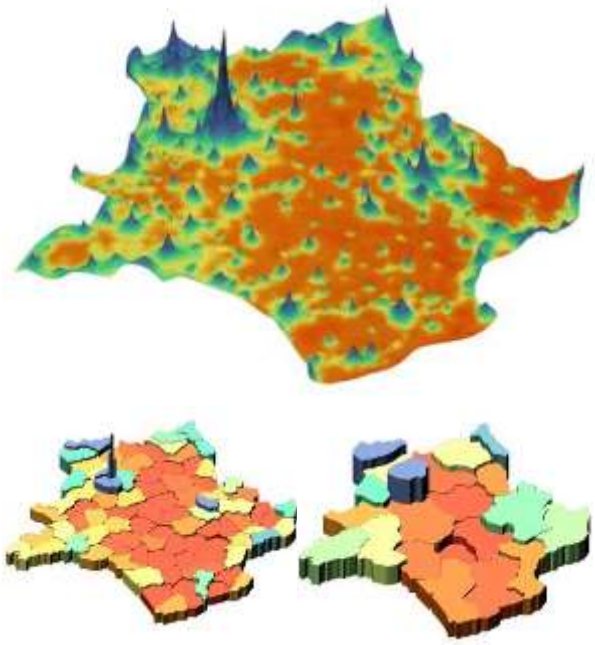
Cartes issues du traitement des données de la base GEOFLA et PVGIS



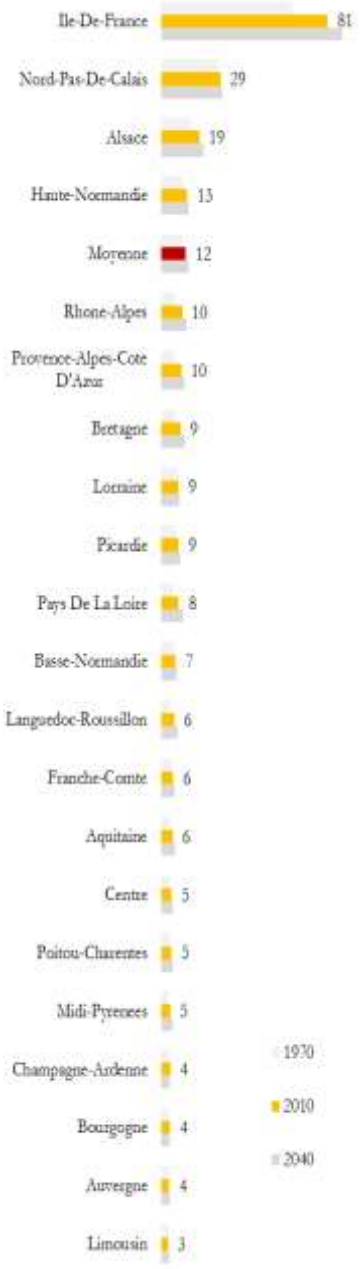
Carte cantonale et carroyage de l'équilibre entre demande (nombre d'habitants) et offre (gisement solaire)

Chaque algorithme tentera de minimiser l'écart entre les ratios des régions, par des mesures de la dispersion de leur dispersion (écart type, moyenne des différences…).

La convergence des ratios sera étudiée à l'aide du coefficient de variation « sigma sur mu », qui caractérise de manière normalisée la dispersion. A l'état initial des régions françaises, présenté ci-dessous, ce coefficient est de 140% et sera à comparer aux résultats présentés par la suite.



Cartographie 3D de l'équilibre offre demande



Classement des régions selon l'équilibre Offre / Demande (Hab. / GWh.an) aux décades 1970, 2010, 2040

Algorithmes de remembrement

Automates cellulaires

A partir d'un territoire français vierge de toute région, N cellules d'initialisation sont choisies aléatoirement parmi les cellules du carroyage des données, pour N régions créées. Itérativement, chaque région évalue l'impact sur son ratio demande sur offre du rattachement d'une des cellules voisines.

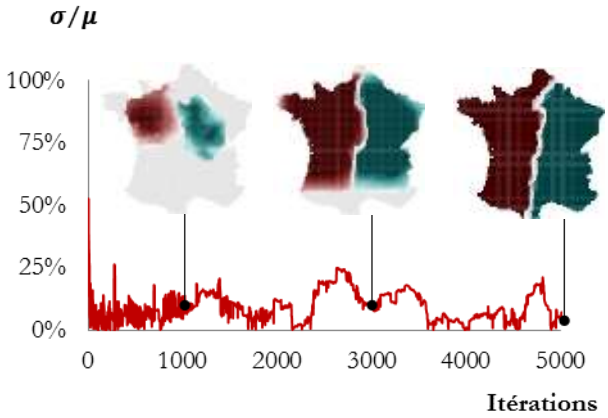
Chaque région est dotée d'une stratégie d'agrégation des cellules : une région ayant un ratio inférieur au ratio moyen des régions cherchera à agréger des cellules faisant augmenter son ratio, et vice versa. Le choix d'une cellule sera donc basé sur l'évaluation des scores des cellules adjacentes, basés sur la propension des cellules à faire évoluer le ratio de la région r_i dans le sens de la stratégie choisie.

Il est possible de moduler ces scores, pour faire prendre en compte à l'algorithme un facteur de forme. Une cellule adjacente est alors également évaluée par rapport à sa proximité avec toutes les autres cellules de la région, et par son impact sur le moment d'inertie de la région (calculé d'après la répartition spatiale de sa population).
Un compromis est à trouver manuellement pour garantir des formes de régions correctes, tout en garantissant une certaine convergence des ratios.

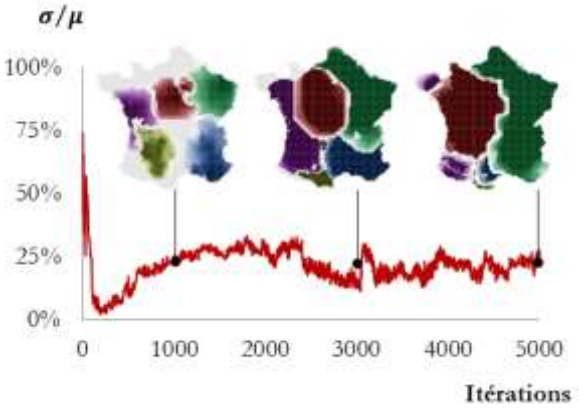
Schéma de principe de formation des régions pour l'automate cellulaire

La convergence du découpage n'est jamais atteinte : chaque région ne "voient" pas les autres et s'attribuent les cellules qui maximisent leur écart au ratio, sans savoir si la transaction va en réalité dégrader l'écart type entre les ratios de manière globale. Une bonne convergence des ratios est elle atteinte périodiquement, comme le montre l'évolution du rapport $\frac{\sigma}{\mu}$ présentée ci-dessous pour 2 et 5 régions.

Certaines transactions ont un effet tellement important sur le ratio des régions (pour les cellules de la région parisienne par exemple) que certains groupes de cellules sont systématiquement rattachés puis relâchés.
Les régions peuvent également se couper en deux et prendre des formes non contiguës, puisqu'elles ne se prennent mutuellement pas en compte.

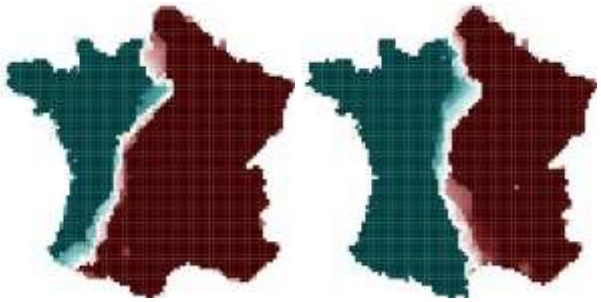


Evolution du coefficient de variation pour deux régions suivant le nombre d'itérations

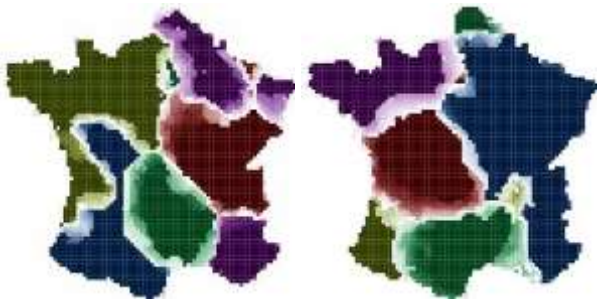


Evolution du coefficient de variation pour cinq régions suivant le nombre d'itérations

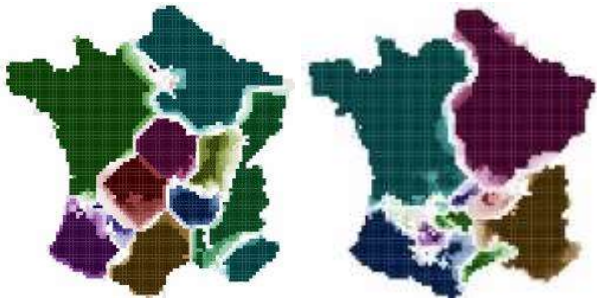
Afin de garantir le dynamisme du processus de découpage et accélérer la convergence des ratios, les cellules les moins bien évaluées par la fonction score de l'algorithme sont "relâchées" (remises en territoire non attribué). La prise en compte du moment d'inertie dans le score permet alors de rejeter les cellules trop éloignées du centre de gravité des populations de la région, produisant des formes plus compactes.



Forme des découpages obtenus pour 2 régions (coefficient de variation 10 - 20 %)



Forme des découpages obtenus pour 5 régions (coefficient de variation 15 - 25 %)



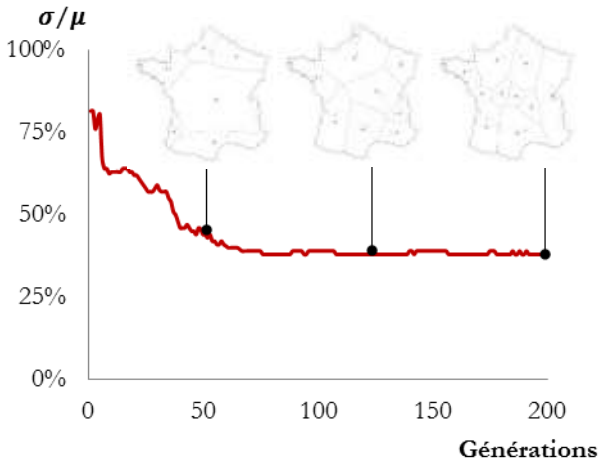
Forme des découpages obtenus pour 10 régions (coefficient de variation 15 - 25 %)

Diagrammes de Voronoï

A partir des N pics de population formés par les grandes agglomérations françaises, un diagramme de Voronoï prend ces points comme points d'initialisation, auxquels sont affectés des poids arbitraires, formant un premier découpage. En agrégeant les données de population et d'irradiation du carroyage à l'aide de ce découpage, les ratios demande sur offre peuvent être calculés.

L'algorithme fait alors varier itérativement les poids des points servant au calcul du diagramme de Voronoï, ce qui a pour effet de modifier les découpages, et donc de faire évoluer les ratios. L'algorithme adopte alors un comportement de type "génétique", chaque découpage effectué étant évalué par l'écart type des ratios, et les itérations devant minimiser le coefficient de variation de la distribution des ratios des régions.

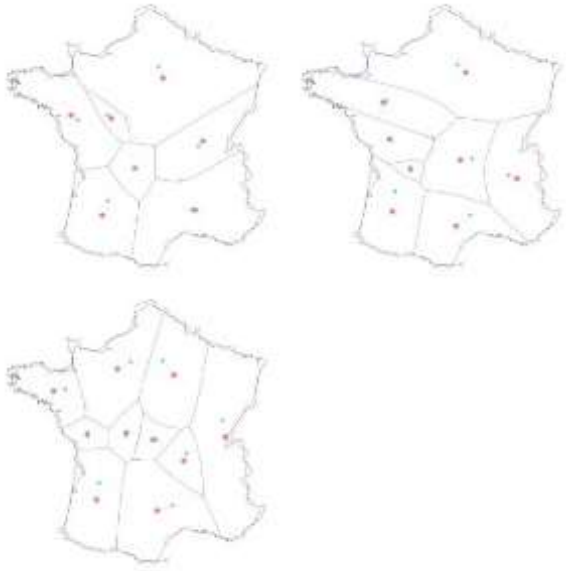
Le système converge vers un équilibre possible des découpages rapidement, en environ 50 itérations. On observe cependant de nombreux découpages équivalents en termes de coefficients de variation, aux formes différentes.



Evolution de la médiane du coefficient de variation, pour chaque génération de l'algorithme génétique

L'algorithme tend à équilibrer les ratios, mais se bloque systématiquement lorsque deux régions fortement peuplées, qui doivent s'étendre pour améliorer leur situation, rentrent en contact (typiquement le Nord Pas de Calais et l'Île de France). On observe également des découpages très tranchés, aux formes très droites, passant parfois par les centres des agglomérations, parisienne notamment.

Afin de débloquer l'algorithme, la possibilité de déplacer les points servant à calculer le diagramme de Voronoï a été implémentée : les régions peuvent s'étendre ou se replier, mais aussi se déplacer sur le territoire français. Un degré de liberté supplémentaire a été également donné au système, au niveau du nombre N de régions à partir desquelles faire progresser l'algorithme.



Formes des découpages obtenus
(coefficient de variation : 38 - 39%)

Optimisation « Administrative »

A partir du découpage actuel, chaque région détermine une liste de départements voisins potentiellement rattachables. Ces listes sont agrégées en une liste à l'échelle de la France, puis chaque transaction entre les différentes régions est évaluée par sa capacité à réduire une mesure de l'écart entre les n ratios r_i, ici la moyenne des différences (qui donne une meilleure convergence observée que le rapport max/min ou l'écart type).

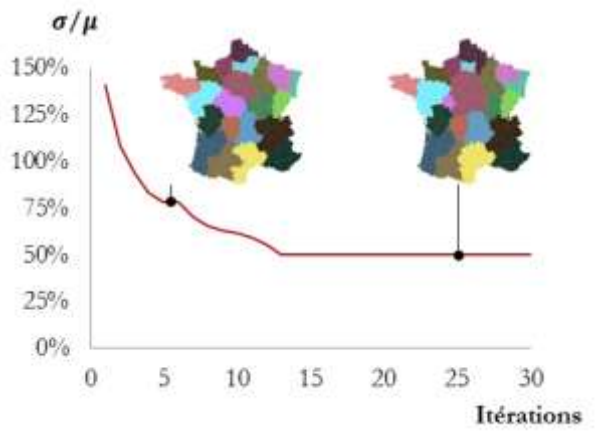
Cette mesure prend ensuite la forme d'un score, à partir duquel la meilleure transaction possible est sélectionnée, sur le modèle de l'algorithme glouton. Les transactions résultant en une région composée de départements non adjacents (retrait de l'Hérault au Languedoc Roussillon, par exemple) sont filtrées et rendues impossibles.

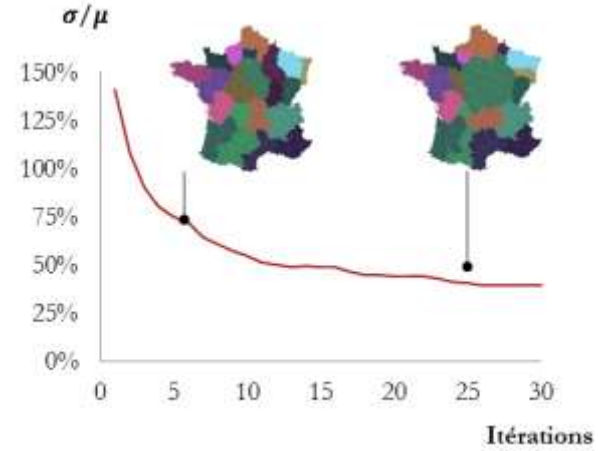
Il est possible de moduler le score plus ou moins par une mesure du degré d'adjacence du département candidat (un département n'ayant qu'un voisin dans la région serait de degré 1, ayant deux voisins dans la région serait de degré 2…). Il est également possible de limiter la taille des régions, ou de leur donner une taille minimum. Ces ajouts permettent de privilégier des formes de région compactes et proportionnées, mais se font au détriment de la performance. Par itération, les écarts entre les ratios tendent alors à diminuer, et permettent une sélection de découpages optimisés.

Une convergence rapide est observée, avec un rapport $\frac{\sigma}{\mu}$ passant de 140% à moins de 50% environ en quelques dizaines d'itérations. Un réglage fin des paramètres de la fonction score des transactions doit cependant être effectué à la main, ces paramètres ayant beaucoup d'influence sur la forme des solutions calculées : un compromis entre convergence des ratios et formes des régions doit ainsi être trouvé.

La succession de transactions est un processus déterministe, pour une fonction score donnée : la transaction optimale de chaque état du système est toujours la même, à partir de l'état initial correspondant au découpage actuel des régions. L'algorithme peut donc converger vers un minimum local et se bloquer, avec une transaction faisant passer un département d'une région à l'autre, puis à l'itération suivante, la transaction inverse.

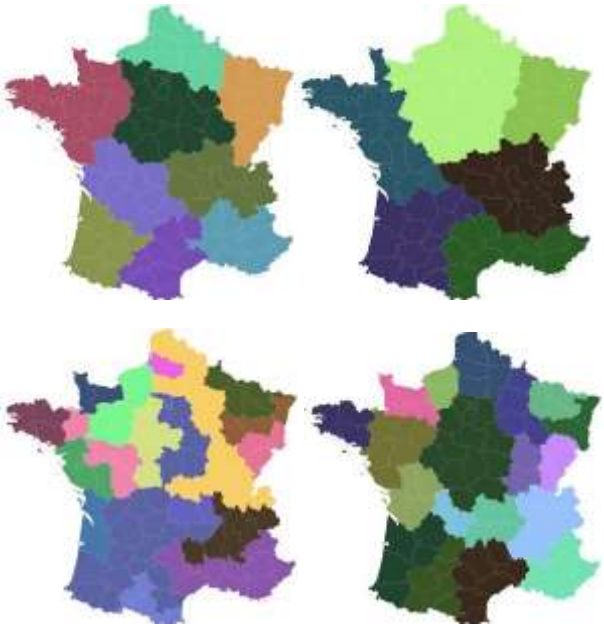
Une autre difficulté est la tendance de l'algorithme à produire des régions de forme politiquement peu réalistes, notamment du fait de l'Île de France qui doit absorber de nombreux départements avant de retrouver un ratio comparable aux autres régions : certaines régions deviennent très grandes et étirées, d'autres ne comptent plus qu'un département.





Afin d'éviter les blocages de l'algorithme, deux stratégies sont proposées. Une mémoire des transactions effectuées est créée, afin d'éviter les optimums locaux lors de la recherche (contrainte de type "No U-Turn"). Au lieu de sélectionner la meilleure transaction à chaque itération, chacune des transactions reçoit une probabilité d'être sélectionnée proportionnelle à sa propension à faire converger le système (ou selon une loi arbitraire de puissance, pour favoriser les bons candidats). Le processus devient alors stochastique et empruntant un chemin dans l'espace des paramètres différents à chaque recherche de solutions.

Vu le nombre de facteurs à prendre en compte pour produire un découpage à la fois performant et réaliste, dont de nombreux facteurs qualitatifs tels la centralité de certains départements dans les régions, ou la viabilité de certains découpages, une collaboration entre l'utilisateur et l'algorithme est mise en place (convergence "assistée"). De manière interactive, pour chaque itération, l'algorithme propose sa transaction optimale, que l'utilisateur peut réaliser ou choisir d'ignorer pour imposer sa transaction.



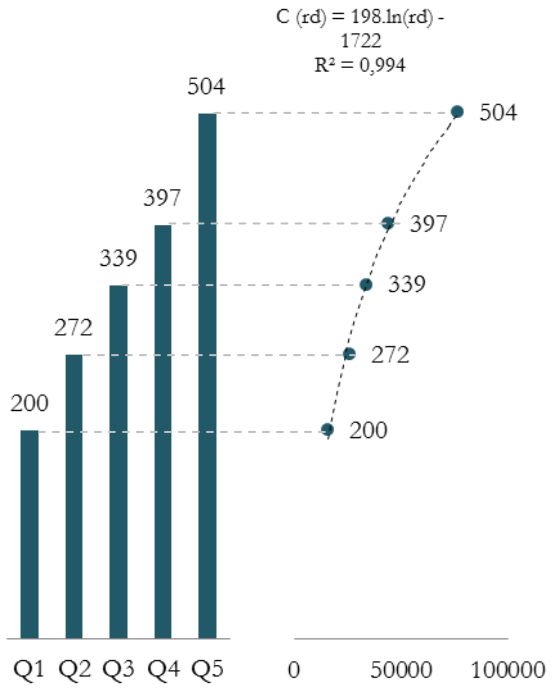
Formes des découpages obtenus
(coefficients de variation, de haut en bas et de gauche à droite : 40%, 35%, 5%, 45%)

Cartographie de la demande énergétique

Méthodologie et cheminement de la recherche

En première approche, nous faisions l'hypothèse que la consommation d'énergie est proportionnelle à la population des territoires. Afin d'affiner nos résultats, nous proposons d'évaluer la demande sur la base d'une étude (Nouvelles représentations de l'énergie, Cahier du Club d'Ingénierie Prospective et Environnement) qui lie niveau de revenu des ménages, différencié par quintile, et consommation énergétique (en faisant l'hypothèse que cette consommation n'a pas évolué par rapport aux données de base de l'étude).

En croisant les données de recensement de l'INSEE avec les résultats de cette étude, nous obtenons une consommation énergétique des cantons et des départements. L'étude du CLIP citée lie les niveaux de revenu à la consommation d'énergie primaire des ménages, différenciée par quintile de revenu disponible. Afin de pouvoir effectuer une projection de ces résultats, de nombreuses hypothèses et approximations sont effectuées, les résultats étant à interpréter comme des ordres de grandeur.



Consommation d'énergie primaire par jour et par ménage, par quintile de revenu disponible en euros (kWh/menage.jour)

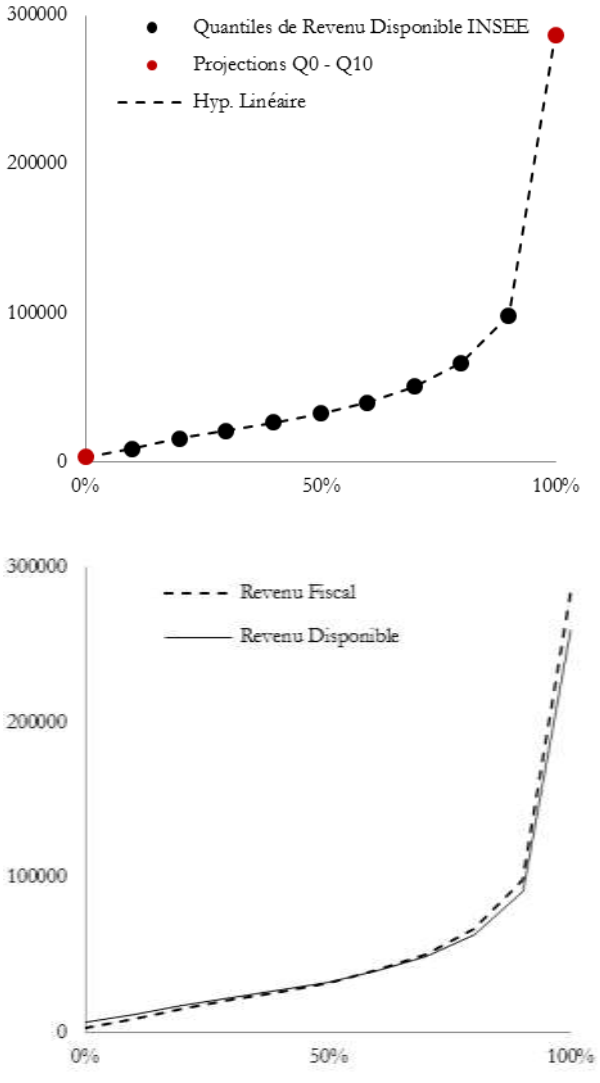
Nous ne disposons que de 5 points pour effectuer la régression entre revenu et consommation énergétique, le modèle sera donc assez performant pour des valeurs moyennes de revenu comprises entre le minimum et le maximum des valeurs de revenu de l'étude, mais sera a priori peu précis pour des points s'éloignant de cet intervalle.

Aux niveaux administratifs cantonal et départemental, nous disposons du revenu fiscal de référence des ménages[335] : pour passer au revenu disponible, une loi de régression linéaire est déterminée sur la base de données nationales[336], puis appliquée à l'échelle locale, en supposant donc que les mécanismes de redistribution et d'imposition sont homogènes sur le territoire français.

De plus, nous ne disposons pas de la description de la distribution de revenus fiscaux complète, mais seulement des quantiles 1 à 9, de la moyenne et de l'écart type de cette distribution. Afin de construire un revenu moyen par quintile tel qu'utilisé dans l'étude, la connaissance de la distribution devrait être complète (du revenu minimum au revenu maximum, et pas seulement le centre de la distribution) et très fine (par pas de 1% environ, au lieu de 10%) pour pouvoir procéder par intégration.

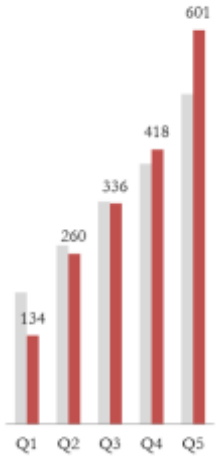
[335] http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?reg_id=99&ref_id=base-cc-rev-fisc-loc-menage
[336] http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=0&id=3658

A partir d'une hypothèse forte de linéarité entre les niveaux des quantiles, et de la connaissance de la moyenne et de l'écart type de la distribution, les valeurs de revenu maximum et minimum, peuvent être approximées, mais ne sont pas utilisables, le revenu minimum étant systématiquement négatif. Nous choisissons donc de fixer le revenu minimum à une valeur arbitraire (à 50% de la valeur du Q1), puis de fixer la valeur du revenu maximum pour respecter uniquement la moyenne de la distribution.

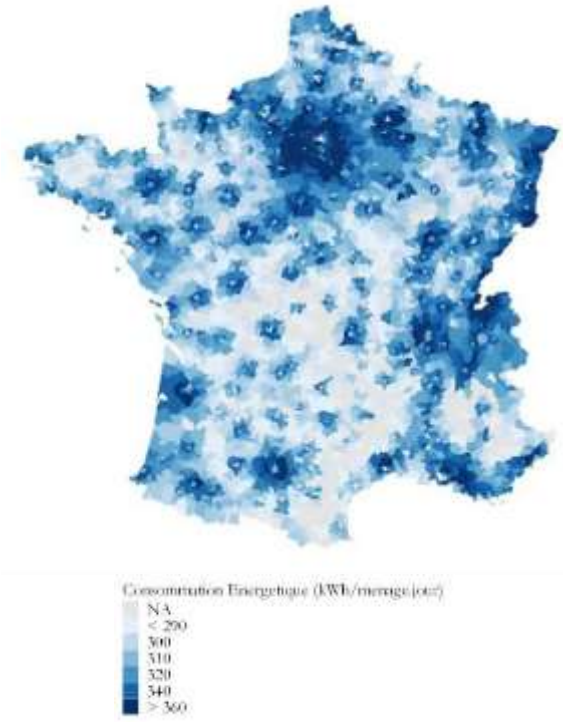


Hypothèses et projections sur la distribution du revenu fiscal du canton-ville de Paris (en Euros), et passage du revenu fiscal au revenu disponible.

Le revenu moyen est ensuite calculé pour les cinq quantiles, pour chaque canton, et injecté dans la loi de consommation déduite de l'étude du CLIP, pour déduire les consommations énergétique de chacun des quantiles, pour chaque canton au niveau national.



Consommation d'énergie primaire par jour et par ménage, par quintile de revenu disponible en euros, pour le canton-ville de Paris (kWh/menage.jour) (valeurs de l'étude du CLIP en gris)

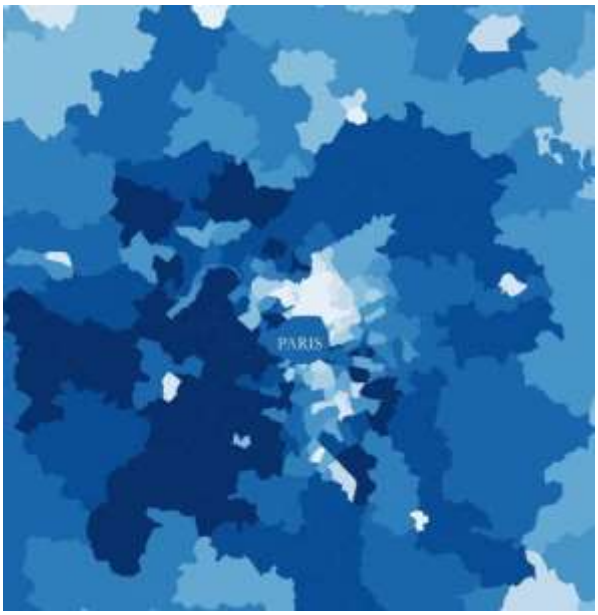


Consommation énergétique primaire moyenne par jour par ménage (kWh/menage.jour)

La cartographie de la demande énergétique primaire ainsi créée reflète les découpages socio-économiques du territoire : les centres villes se différencient nettement de leur couronne péri-urbaine, et les lignes de partage des agglomérations entre zones riches et pauvres apparaissent (par exemple pour la région parisienne, avec une nette opposition entre Est et Ouest).

Il est probable que les différences entre les consommations réelles des ménages urbains et péri-urbains soient encore plus marquées en réalité. En effet, la base de nos calculs utilise une étude nationale ne prenant en compte les besoins en transport que de manière agrégée, et donc potentiellement réaffectés à tous les ménages : il serait nécessaire différencier parmi les ménages les types de transports utilisés, voiture individuelle et transports en commun notamment.

Cette approche en énergie primaire, qui prend donc en compte l'énergie grise de tous les processus liés aux consommations des ménages, permet néanmoins de créer une cartographie de la demande "relocalisée". Si l'énergie n'était exportable que sur de très courtes distances et que chaque territoire devait devenir autonome pour sa production d'énergie et de biens, la distribution des consommations en France aurait cet aspect, avec des agglomérations très consommatrices malgré des centres systématiquement en retrait.



Consommation énergétique primaire moyenne par jour par ménage en région parisienne : apparition du clivage Nord – Est / Sud – Ouest (kWh/ menage.jour)

Glossaire

Analyse de cycle de vie (ACV)

Méthode d'évaluation environnementale qui permet de quantifier les impacts d'un élément sur l'ensemble de son cycle de vie, depuis l'extraction de la matière première qui a servi à le produire jusqu'à son élimination ou transformation complète.

Agent (énergétique)

Territoire défini par une emprise spatiale et une comptabilité énergétique. Voir géonergie.

Aérogénérateur

Ou éolienne. Voir éolien.

Anergie

Energie de « qualité nulle ». L'anergie est aussi égale à la différence entre énergie et exergie. L'exergie détruite au cours d'une réaction est appelé « anergie ». Ce phénomène est lié à l'entropie du système et de son environnement, qui ne peut qu'augmenter au cours d'une transformation réelle, non réversible.

Autarcie

Etat d'un territoire qui n'échange pas de flux d'énergie avec les autres territoires.

Automate cellulaire

Objet mathématique et informatique unitaire (type cellule d'une grille) évoluant selon des règles très simple. Les évolutions sont des générations auxquels sont appliquées les règles.

Autonomie

Etat d'un territoire n'ayant pas besoin d'échanges d'énergie avec les territoires environnants pour couvrir ses besoins.

Biomasse

Energie primaire disponible sous forme de matières organiques.

Carnot (cycle de)

Cycle thermodynamique théorique le plus efficace pour obtenir du travail à partir de deux sources de chaleur de températures constantes.

Chaleur fatale

Rejets thermiques qui, s'ils ne sont pas utilisés au moment où ils sont disponibles, seront perdus.

Concentration (solaire à)

Technologie concentrant les rayons du soleil à l'aide de miroirs, afin de chauffer un élément qui permet en général de produire de l'électricité.

Constante solaire

La constante solaire exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de 1 m² située à une distance de 1 u.a. (unité astronomique, distance moyenne Terre-Soleil), exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence d'atmosphère. Pour la Terre, c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère. Sur Terre elle est de : 1 360,8 W/m².

Contenu urbain

Désigne la population présente sur un territoire, calculée à partir du taux d'occupation réel dans l'intervalle d'établissement du bilan énergétique. Associé aux variables intensives *d* (densité de population) et *e* (emprise individuelle dans le bâti).

Contenant urbain

Désigne l'espace bâti d'un territoire accueillant le contenu urbain. Associé aux variables intensives *c* (coefficient d'emprise du bâti) et *h* (nombre de niveaux du bâti).

Degré-jours

Le nombre de degrés jours unifiés (Dju) est déterminé en faisant la différence entre la température de référence, par exemple 18 °C, et la moyenne de la température minimale et la température maximale du jour considéré.

Demande énergétique

Flux d'énergie nécessaire au fonctionnement et au développement du territoire tant du point de vue du contenant que du contenu.

Démolition sélective

Méthode de démolition permettant le réemploi de l'énergie et des matériaux stockés par le contenant urbain (bâtiments, infrastructures…).

Densité urbaine

Cette quantité mesure la densité d'occupation de la surface urbaine. La densité est une mesure instantanée ou moyennée.

$$d = \frac{n_{individus}}{m^2_{sol}}$$

Diffus (rayonnement)

Le rayonnement global est la somme du rayonnement diffus et directe. Le rayonnement diffus est le rayonnement provenant de l'ensemble de l'atmosphère et qui dépend de sa composition. Il se diffuse en traversant l'atmosphère.

Direct (rayonnement)

Le rayonnement global est la somme du rayonnement diffus et directe. Le rayonnement direct est la composante directe qui atteint directement la surface terrestre et varie en fonction de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon.

Emprise bâtie

De façon générale, sera considérée comme « emprise bâtie» tout ce qui possède un toit, qui créé une ombre et une protection partielle à la pluie. Est associé à la variable *c* dans la *Formalisation.*

Emprise énergétique

Total des énergies nécessaires à la réalisation/satisfaction d'un usage qui permet de lier les consommations finales à l'ensemble du besoin énergétique qu'elles créent.

Energie incorporée

Énergie nécessaire pour permettre la mise à disposition du bien ou de l'offre de service au consommateur final, en amont de l'usage.

Energie grise

Voir énergie incorporée.

Energie mécanique

Energie d'un système emmagasinée sous forme d'énergie cinétique et/ou d'énergie potentielle mécanique. C'est une quantité conservée lorsqu'aucune force extérieure n'intervient dans le système

Entropie

Fonction d'état qui sert à mesurer le degré de désordre d'un système. L'entropie d'un système isolé ou fermé augmente toujours.

Exergie

En thermodynamique, l'exergie est une grandeur permettant de calculer le travail maximal que peut fournir un système à l'extérieur lorsqu'il se met à l'équilibre thermodynamique avec son environnement. Le travail maximum récupérable est égal à l'opposé de la variation d'exergie au cours de la transformation. Si l'énergie ne peut que se transformer sans jamais se détruire, l'exergie ne peut en revanche que diminuer dans les transformations réelles.

Fissile (énergie)

Energie primaire disponible lors de la fission de matières fissiles telles que l'uranium (division du noyau des atomes en d'autres noyaux plus légers).

Fossile (énergie)

Energie primaire disponible produite à partir du soleil ancien et stockée sur terre depuis des milliers d'année (charbon, pétrole et gaz)

Géothermique (énergie)

Energie issue de l'activité interne du globe terrestre, disponible sous forme de chaleur.

Géonergie

Discipline étudiant les caractéristiques spatiales et temporelles de l'utilisation d'énergie des territoires à l'aide d'une comptabilité énergétique, exergétique et anergique : étude des sources d'énergies primaires, des niveaux de consommation, des relations avec l'environnement et des relations entre territoires.

Hydrocarbures

Composés organiques formés exclusivement d'atomes de Carbone et d'Hydrogène, dont les hydrocarbures fossiles, stockés dans la croûte terrestre, font partie (pétrole, gaz, charbon…).

Information

Tout objet dont peuvent être dérivés mesures quantitatives ou faits qualitatifs, relatifs à un sujet. Voir néguentropie

Irradiation terrestre

Quantité d'énergie issue du rayonnement solaire reçue par la terre.

« Maximum Entropy Production » (Principle of)

Ce principe stipule que le cheminement entre deux niveaux d'énergie d'un système se fait par celui maximisant l'entropie, pour atteindre le niveau d'entropie maximale stipulé par le principe d'entropie maximale. Voir François Roddier en bibliographie

Mix énergétique

Répartition des sources d'énergies primaires (combustibles fossiles, rayonnement solaire, énergie thermique terrestre…) consommées pour la production des différents types d'énergie consommés (électricité, chaleur).

Néguentropie

Mesure du degré d'organisation, d'ordre et d'information dans système, par opposition à la tendance naturelle des systèmes au désordre, l'entropie.

Offre énergétique

Quantité d'énergie disponible pour un territoire sous forme de solaire récent directement accessible dans l'espace du territoire. Peut aussi comprendre pour certains territoires les énergies renouvelables non solaires : géothermie profonde et énergie marémotrice.

Permanence énergétique

Pour un système (territoire), point d'équilibre énergétique atteint lors de l'égalité entre l'*offre* énergétique, c'est-à-dire le solaire récent, et la *demande* énergétique, c'est-à-dire la consommation du système étudié.

Puissance

Quantité d'énergie par unité de temps. Généralement exprimée en Watt.

Régime permanent

Régime énergétique d'un territoire en état de permanence énergétique, qui consomme au plus l'énergie disponible dans son offre de solaire récent (aucune ponction sur le stock n'est donc réalisée).

Résilience

Capacité d'un territoire à s'adapter aux changements de son environnement afin de garantir son fonctionnement et son développement continu.

Sankey (diagramme)

Diagramme de représentation de circulation et de distribution de flux dans lequel le volume de ces flux est figuré par la largeur des flèches.

Solaire ancien

Quantité d'énergie disponible sous forme de flux (rayonnement, vent) ou stockée sur terre sous forme de matières à taux de formation rapide (quelques mois à quelques années : agriculture, production de bois).

Solaire récent

Quantité d'énergie disponible sous forme de flux (rayonnement, vent) ou stockée sur terre sous forme de matières à taux de formation rapide (quelques mois à quelques années : agriculture, production de bois).

Solarisation

Part de sa consommation énergétique couverte par l'énergie solaire et ses dérivées, ou de manière opposée la part de consommation énergétique non couverte par le recours aux énergies fossiles et nucléaires.

Stock (de différents termes)

Quantité d'énergie à la disposition d'un territoire pour couvrir ses besoins énergétiques, hors apports renouvelables.

Voronoï (diagrammes de)

Décomposition d'un espace métrique à partir d'un nombre discret de points. Chaque point se voit affecter une partition de l'espace constituée de l'ensemble des points plus proches de ce point particulier que de tous les autres points.

Bibliographie

Ouvrages, thèses et articles

Généralités sur environnement, climat et énergie

- Banerje R et al., *Global Energy Assessment. Toward a Sustainable Future,* International Institute for Applied Systems Analysis, Cambridge University Press, 2012
- Commissariat général au développement durable, *Chiffres clés de l'énergie*, édition 2012.
- de Rosnay, Joël, *Le macroscope. Vers une vision globale*, Seuil coll. "Points", 1975
- Descola, Philippe, *Par-delà nature et culture*, Paris, Gallimard, 2005.
- Diamond, Jared, *De l'inégalité parmi les sociétés : Essai sur l'homme et l'environnement dans l'histoire*, Paris, Gallimard, 2000, [éd. amér.1997].
- Henson, Robert, *The Rough Guide to Climate Change*, Londres, 2006.
- Hollnagel, Erik et Woods, David D., *Resilient Engeenering : Concept and Precept*, Ashgate, 2006.
- Jancovici, Jean-Marc, *C'est maintenant ! : 3 ans pour sauver le monde*, Seuil, coll. « Points », 2009.
- Jonas, Hans, *Pour une éthique du futur*, Paris, Payot, 1997.
- Larrère, Catherine et Raphaël, *Du bon usage de la nature : Pour une philosophie de l'environnement*, Paris, Flammarion, coll. « Champs », 2009 [Aubier, 1997].
- Lovins, Amory, Hunter, B. et L., von Weizsäcker, Ernst, *Facteur 4, Rapport au club de Rome*, Mens, Terre vivante, 1997.
- MacNeill J. R., *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World*
- McKay David, *Sustainable Energy Without the Hot Air*, UIT Cambridge, 2009
- Meadows Donella, Meadows Dennis, Randers Jorgen. *Les Limites de la Croissance (dans un monde fini)*. Édition Rue de l'échiquier, mars 2012.
- MVRDV et Huet, Sylvestre, Climax, catalogue d'exposition à La Grande Halle de la Villette, Adam Biro-Cité des sciences-Carré, 2003.
- Prigogine, Ilya, Stengers, Isabelle, *La Nouvelle Alliance, Métamorphose de la science,* Gallimard, coll. « Folio », 1986 [1979].
- Rifkin Jeremy, *La troisième révolution industrielle. Comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et le monde*, Éditions Les Liens qui libèrent ,2012
- Salomon Thierry, *Manifeste NégaWatt*, coédition Actes Sud/Colibris - Collection : Domaine du possible, janvier 2012.
- Salomon, Thierry, Jedliczka, Marc, Association Négawatts, Changeons d'énergie, Transition, mode d'emploi, Arles, Actes Sud, 2013.
- Schwartz, Peter et Randall, Doug, *Rapport secret du Pentagone sur le changement climatique*, Paris, Allia, 2006.
- Singh Madanjeet, *L'énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature*, 1998
- Smil, Vaclav, *Energy Myth and Realities: Bringing Science to the Energy Policy Debate*, Washington, AEI Press, 2010.
- Wilson, William G., Constructed Climates, a Primer on Urban Environnments, Chicago, University Of Chicago Press 2011.

Visualisation, représentations de la complexité et métabolisme

- Barles Sabine, *Bilan de matières brutes, Haute-Garonne, 2006 ; méthode dérivée de la méthode Eurostat*, 2009 & 2011
- Barles Sabine, *Mesurer la performance écologique des villes et des territoires : Le métabolisme de Paris et de l'Île-de-France*, Rapport de recherche final pour le compte de la ville de Paris, 2004
- Barles Sabine, *Urban Metabolism of Paris and Its Region, Journal of Industrial Ecology*
- Brinton Willard C., *Graphic Presentation*, 1939
- Brunner Paul H., Rechberger Helmut, *Practical Handbook of Material Flow Analysis*, draft, 2003
- Hausmann, Hidalgo et al., *The Atlas of Economic Complexity*

Thermodynamique et exergie

- A. Kleidon R.D. Lorenz (Eds.), *Non-Equilibrium thermodynamics and the Productionof Entropy, Life, Earth, and Beyond*, Springer
- Balocco C., Papeschib S., Grazzinia G., Basosib R., *Using exergy to analyze the sustainability of an urban area*, Ecological Economics 48 (2004) 231–244
- Cochet Yves, *Economie et Thermodynamique* dans Cosmopolitiques n°9, juin 2005
- Ertesvag Ivar S., *Energy, exergy, and extended-exergy analysis of the Norwegian society* 2000
- Gong Mei,Wall Göran, *On exergy and sustainable development—Part 2: Indicators and methods*, Exergy Int. J. 1(4) (2001) 217–233, 2001
- Roddier François, *Thermodynamique de l'évolution, un essai de thermo-bio-sociologie*, Parole Editions, 2012
- Sciubba Enrico, *A brief Commented History of Exergy From the Beginnings to 2004*, Int. J. of Thermodynamics, Vol. 10 (No. 1), pp. 1-26, March 2007

Offre : généralités sur les énergies renouvelables

- Boyer, J. S. (1982). *Plant productivity and environment. Science*, 218 (4571) :443–448.
- EPIA, *Solar Photovoltaics, Competing in the energy sector, on the road to competitiveness*, European Photovoltaic Industry Association, 2011

- European Commission, *Concentrating solar power – from research to implementation*, 2007[337]
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA), *Solar Generation 6: Solar Photovoltaic Energy Empowering the World,* EPIA, Brussels, 2011
- European Wind Energy Association, *Wind Energy - The Facts: Volume 1 Technology*, EWEA, Brussels, 2004
- Ferry Robert, Monoian Elizabeth, *A field guide to renewable energy technologies,* Land Art Generator Initiative[338], 2012
- Freeston, D. H,. *Direct uses of geothermal energy* 1995[339]
- Gipe, Paul, *Le grand livre de* l'éolien, Le Moniteur, 2006
- GlobalData, *Small Wind Turbines- Global Market Size, Analysis by Power Range, Regulations and Competitive Landscape to 2020*, GlobalData, Denmark, 2011
- INES, *Quelles sont les perspectives technologiques en solaire photovoltaïque*, 2011.
- International Energy Agency (IEA) (2010), *Technology Roadmap: Concentrating Solar Power*, IEA, Paris[340].
- International Energy Agency, *Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy*, IEA, OECD, Paris, 2010
- IPCC, *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, Cambridge University Press, 2012
- IRENA, *Concentrating Solar Power, Renewable energy technologies : cost analysis series*, Juin 2012
- IRENA, *Solar photovaïcs, Renewable energy technologies : cost analysis series*, Juin 2012
- IRENA, *Wind power, Renewable energy technologies : cost analysis series*, Juin 2012
- Layzell, D. B., Stephen, J., et Wood, S. M., *Exploring the potential for biomass power in Ontario*[341]. 2006
- Lhomme, JC, *Les énergies renouvelables*, ed Delachaux et Nieslé, 2004
- Massachusetts Institute of Technology. *The future of geothermal energy*[342], 2006
- Mazria, Edward, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, Marseille, Parenthèses, 1979
- McKay, David J. C., *L'Energie durable, pas que du vent*, Oxford, De Boeck, 2012.
- NREL, *Concentrating Solar Power Projects Database*, US Department of Energy[343], 2012
- Royal Commission on Environmental Pollution, *Biomass as a renewable energy source*, 2004[344].
- Solar Paces, Estela, Greenpeace, *Concentrating Solar Power*, Global Outlook 09, Why Renewable Energy is Hot
- Weller B., Hemmerle C ;, Jakubetz S., Unnewehr S, *Photovoltaics Technology Architecture Installation*, Edition Detail, 2010
- Zhu, X.-G., Long, S. P., et Ort, D. R. *What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass ?* Current Opinion in Biotechnology, 19 :153–159, 2008.

[337] www.solarpaces.org/Library/library.htm
[338] http://landartgenerator.org/LAGI-FieldGuideRenewableEnergy-ed1.pdf
[339] geoheat.oit.edu/bulletin/bull17-1/art1.pdf
[340] http://www.iea.org/papers/2010/csp_roadmap.pdf
[341] www.biocap.ca/files/Ont_bioenergy_OPA_Feb23_final.pdf.
[342] geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf
[343] http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by_country.cfm
[344] www.rcep.org.uk

Stocks : généralités sur les stocks à différents termes[345]

- Chevalier, Jean-Marie, Derdevet, Michel et Geoffron, Patrice, *L'Avenir énergétique : Cartes sur table*, Gallimard, coll. « Folio », 2012.
- Church, R. A., Hall, A., et Kanefsky, J. *The history of the British coal industry. Vol. 3, 1830–1913 : Victorian pre-eminence.* Clarendon, Oxford, 1986
- Cochet Yves, *Pétrole Apocalypse*, Fayard, 2005
- Herring, J., *Uranium and thorium resource assessment.* In C. J. Cleveland, editor, Encyclopedia of Energy. Boston University, 2004
- Jancovici Jean-Marc et Grandjean Alain, *Le plein s'il vous plait*, Seuil, 2006
- Wingert Jean-Luc, *La vie après le pétrole, de la pénurie aux énergies nouvelles*, Collection Autrement, 2005

Stocks : focus sur énergie incorporée et géométries

- Bejan Adrian, Lorente Sylvie, *The constructal law of design and evolution in nature*, The Royal Society, 2010
- Beukers et Van Hinte, *Lightness: The Inevitable Renaissance of Minimum Energy Structures*
- Kazazian Thierry, *Design et développement durable : Il y aura l'âge des choses légères,* Victoires Editions, 2003
- Kolokotrones T, Van Savage, Deeds EJ, et coll. *Curvature in metabolic scaling.* Nature 2010, 464:753-6.
- McDonough, William et Braungart, Michael*, Cradle to Cradle. Créer et recycler à l'infini*, Paris, Alternatives, 2011.
- P. Pourouchottamin, C. Barbier, L. Chancel, M. Colombier, *Nouvelles représentations de l'énergie*, Cahier du Club d'Ingénierie Prospective et Environnement, avril 2013
- Valero Delgado Alicia*, Exergy Evolution of the mineral capital on earth*, 2008

Demande : généralités sur architecture et urbanisme[346]

- Antoni Jean-Philippe, Fléty Yann, Vuidel Gilles, de Sède-Marceau Marie-Hélène, *Vers des indicateurs locaux de performance énergétique : les étiquettes énergétiques territoriales. Une première approche à partir de l'estimation des mobilités quotidiennes*, 2009
- Arantes, Laetitia, *L'Intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située, thèse de doctorat*, ADEME/CSTB/Navier (dir. Olivier Baverel), fin 2012.
- Banham, Reyner, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, Marseille, Parenthèses, 2011 [1969].

[345] Comprend à la fois les stocks énergétiques à très long terme (solaire ancien et la question de la déplétion des stocks d'hydrocarbures) mais aussi les stocks à court et moyen terme à la fois réversible (par exemple les stockages de chaleur intersaisonnier) comme à court terme.
[346] Certains de ces ouvrages comprennent évidemment des réflexions plus globales sur l'adéquation offre-stock et demande à l'échelle du projet architectural et urbain.

- Borasi, Giovanna et Zardini, Marko, *Désolé plus d'essence. L'Innovation architecturale en réponse à la crise pétrolière de 1973*, Montréal, CCA, 2007.
- Chatelet Alain (dir.), *Architecture climatique. Une contribution au développement durable* ; Tome 1, Bases physiques (avec Brejon, Paul et Fernandez, Pierre) ; Tome 2, Concepts et Dispositifs (avec Fernandez, Pierre et Lavigne, Pierre) Aix-en-Provence, Edisud, 1994 et 2000.
- Daniels, Klaus, *The Technology of Ecological Building: Basic Principles and Measures, Examples and Ideas*, Bâle, Birkhäuser, 1997.
- Dutreix, Armand, *Bioclimatisme et Performances énergétiques des bâtiments*, Paris, Eyrolles, 2010.
- Fernández-Galiano, Luis, *Fire and Memory: On Architecture and Energy*, Cambridge (Mass.), The MIT Press, 2001.
- Friedman Yona, *L'architecture de survie*
- Gonzalo, Roberto et Habermann, Karl J., *Architecture et Efficacité énergétique*, Bâle, Birkhaüser, 2008.
- Hegger, Manfred, Fuchs, Matthias, Stark, Thomas et Zeumer, Martin, *Construction et Energie : Architecture et Développement durable*, Lausanne, PPUR, 2011.
- Heschong Lisa, *Architecture et Volupté thermique*, Marseille, Parenthèses, 1981 [1979].
- Hopkins Rob, *Manuel de transition, de la dépendance au pétrole à la résilience locale*, 2010
- Id. et Schwaiger, Elizabeth, *Advanced Building Systems: a Technical Guide for Architects and Engineers*, Bâle, Birkhäuser, 2003.
- Kim, *Consommation énergétique, Paris 1801-2002*, 2012
- Liebard, A., De Herde, A. 2005. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*. éditions du Moniteur. 778 pages
- Lopez Fanny, *Déterritorialisation énergétique 1970-1980 : de la maison autonome à la cité auto-énergétique, le rêve d'une déconnexion*, 2010
- Masboungi, Ariella (dir.), *Projets urbains durables. Stratégies*, Paris, Le Moniteur, 2012.
- Maïzia Midjid, *Topologie urbaine : l'énergie de la ville*, mémoire HDR de l'UTC, 2008
- Mostafavi, Mohsen (dir.), *Ecological Urbanism*, Baden, Lars Müller Publishers-Harvard University Graduate School of Design, 2010.
- Olgyay, Victor, *Design with Climate, A Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton, Princeton University Press, 1963
- Peuportier, Bruno, *Eco-Conception des bâtiments et des quartiers*, Paris, Presses de l'Ecole des Mines, 2008.
- Salat, Serge, *Les Villes et les Formes, sur l'urbanisme durable*, Paris, Hermann éditeurs, 2011.
- Salat, Serge, *The sustainable Design Handbook - China*, Paris, CSTB, 2006.
- Schittich, Christian (dir.), *Solar Architecture*, Münich, Détail, 2003.
- Souami, Taoufik, *Ecoquartiers et urbanisme durable*, Paris, La Documentation française, 2010.
- Tromeur E., Ménard R., Soulié C., and Toubin M., *Resilis project: urban resilience within the context of climate change*, 2nd World Progress on Cities and Adaptation to Climate Change, ICLEI, Resilient Cities 2011, Bonn, Germany, 3-5 June, 2011.
- Van der Ryn, Sim et Stuart Cowen, *Ecological Design*, Washington, Island Press, 1996.
- Vigano, Paola, *Les Territoires de l'urbanisme, Le Projet comme producteur de connaissance*, Genève, MetisPresses, 2012.
- Wright, David, *Manuel d'architecture naturelle*, Marseille, Parenthèses 2004.

Demande : focus sur formes urbaines

- Bettencourt Luís M. A., Jose Lobo, Dirk Helbing, Christian Kühnert and Geoffrey B. West, *Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities*, PNAS, April 2007
- CETE Normandie-Centre DEIOA, *Densité de population et morphologie du bâti*
- Charmes E., *Effet de mode ou solution durable ? La densification en débat*, Etudes foncières, n°145, mai-juin 2010
- Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme, *Habitat formes urbaines, Densités comparées et tendances d'évolution en France*, 2006
- Fouchier V., *Les densités urbaines et le développement durable, le cas de l'Ile-de-France et des villes nouvelles*, Edition du SGVN, December 1997
- Frankhauser Pierre, *La formation fractale des tissus urbains, Cahiers de géographie du Québec*, vol. 42, n° 117, 1998, p. 379-398.
- Kennedy C., Steinberger, J., Gasson, B., Hansen Y., Hillman, T., Havranek, M., Pataki, D., Phdungsilp, A., Ramaswami, A., Villalba Mendez, G., *Greenhouse Gas Emissions from Global Cities*, Environ. Sci. Technol. 2009, 43, 7297–7302
- Knowles, Ralph L., *The Solar Envelope: its meaning for energy and buildings*, Energy and Buildings, n°35, 2003, pp.15-25.
- Louail Thomas, *Comparer les morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis par la simulation à base d'agents. Approches multi-niveaux et environnements de simulation spatiale.*
- Maïzia M, Houdant N. , Joliton D., Rimmel L., Menard R., Berge S. , Teller J., Viejo Garcia P., Lacoste G., Lerolles H., *Les gisements du développement urbain : analyse quantitative à l'horizon 2050 des consommations énergétiques et des émissions de CO2 des tissus urbain*s, PUCA, 2010
- Menard R., *Dense Cities in 2050 : The Energy Option ?*, Summer Study Proceedings, ECEEE, juin 2011, 15 pages

Demande : focus sur alimentation

- Billen Gilles, *Empreinte alimentaire de Paris, Paris 2030*, 2009-2011, Laboratoire Sisyphe CNRS

Demande : focus sur mobilités

- Ademe, *Les transports électriques en France : un développement nécessaire sous contraintes*, Ademe &Vous, Stratégie & études, n°21, 21 juillet 2009
- Allaire J., *Choisir son mode de ville : Formes urbaines et transports dans les villes émergentes* , Les cahiers de Global Chance - N° 21 - mai 2006
- Breheny.M, *The compact city and transport energy consumption*, Transactions of the Institute of British Geographers, Volume 20, Number 1, March 1995 , pp. 81-101
- CCFA, *Tableau de bord automobile,* Premier trimestre 2009
- Frank L. D., Pino G., *Impacts of mixed use and density on utilization of three modes of travel : single occupant vehicle, transit and walking*, Transportation Research 1466, 1994, pp. 44-52.
- Grazi. F, Van den Bergh JCJM, *Spatial organization, transport, and climate change: Comparing instruments of spatial planning and policy*, Ecological Economics 67 (2008) 630 – 639
- Hickman.R, Banister.D, *Transport and reduced energy comsumption: what role can urban planning play?*, Transport Studies Unit Oxford University Centre for the Environment – Working paper N°1026 September 2007
- Lefèvre.B, *Long-term energy consumptions of urban transportation: A prospective simulation of transport–land uses policies in Bangalore*, pour Benoit Lefevre PhD thesis, defended in December 2007 - Energy Policy (2008), doi:10.1016/j.enpol.2008.10.036
- Massot M. H, Korsu E., Eynault C., *Lieux de travail, lieux de résidence : figures de leur mise en cohérence et de leurs impacts sur les termes du développement métropolitain durable*, Territoire en mouvement, numéro spécial «Mobilité, Structuration et restructuration des espaces métropolitains », Lille, 2006.
- Morcheoine A., *Transports de marchandises, énergie, environnement et effet de serre*, ADEME, 2006, 26 p.
- Newman P., Kenworthy J., *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook*, Brookfield, Gower Publishing, 1989
- Newman P., Kenworthy J., *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook*, Brookfield, Gower Publishing, 1989
- Newman P., Kenworthy J.,Urban *Design to Reduce Automobile Dependence*, Opolis , 2006, Opolis, UC Riverside
- Newman P.,Kenworthy J., *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*, 1999, Washington D.C., Island Press
- Newman, P. Kenworthy, J. and Laube, F. (1999) *An International Sourcebook of Automobile Dependence in Cities, 1960 –1990*, Boulder, University Press of Colorado
- Nicolas J.P., Mignot D., *Transport-Environment Issues and Countermeasures in Various Metropolises: Lyon*, in Nakamura H., Hayashi Y., May A. D. (Eds.). Urban Transport and The Environment - An International Perspective, Oxford : Elsevier, 2004. pp. 285-292.
- Nicolas J.P., Verry D., *Indicateurs de mobilité durable : outils d'analyse comparative de la mobilité urbaine* » [CD-ROM]. In : ASRDLF. Villes et territoires face aux défis de la mondialisation –XLIème colloque de l'ASRDLF, 5-7 septembre 2005, Dijon, 2005, 20 p.
- Ntziachristos L., Samaras Z., COPERT III *Computer programme to calculate emissions from road transport*, Methodology and emission factors (Version 2.1), Technical report No 49, ETC/AEM, European Environment Agency, nov. 2000, 86 p.
- Nuissl H, Haase D, Lanzendorf M, Wittmer H, *Environmental impact assessment of urban land use transitions—A context-sensitive approach*
- Orfeuil J.P., *Déplacements, contrainte énergétique et effet de serre : quelques repère pour un débat*, Cahiers de l'IAURIF: Contraintes énergétiques et mutations urbaines, 147, février 2008, pp. 88-98.
- Raux C., Traisnel J.P., Pochet P., Maizia M., Croissant Y., Bagard V., Peguy P.Y. (2006) *Analyse et modélisation des comportements transports-habitat-localisation*s. ETHEL. Rapport R3. Action Concertée CNRS – Ministère de la Recherche. LET, Lyon, septembre 2006, 127 p.
- Roby F., *Vers la voiture sans pétrole* ?, EDP Science, 2006

Vidéos

- Geoffrey West, *The surprising math of cities and corporations*
- François Roddier, *La thermodynamique de l'évolution : du Big Bang aux sciences humaines*, Conférence donnée à l'IAP le 5 octobre 2010[347], par François Roddier, astrophysicien.
- Paine Ch., *Who Killed the Electic Car?*, documentaire long-métrage (USA), 1h32, 2006

Base de données disponibles

Données sur l'offre

- Inventaire mondial des énergies renouvelables, energies-renouvelables.org
- Cartographies par l'Irena, http://irena.masdar.ac.ae/
- Sur la géothermie en France, geothermie-perspectives.fr/
- Technologie de cadastre solaire et plusieurs exemples d'application aux Etats-Unis, en.mapdwell.com
- Sur la biomasse et les ressources mondiales des sols, uved.fr/fileadmin/user_upload/modules_introductifs/module2/site/html/m2c2_m2c2p4_4.htm
- Interactive Visualization and Measurement of Urban Areas http://urbmet.org/

Données sur la demande

- Cartographie mondiale de la demande alimentaire par habitant et par jour, http://knoema.com/gamzxd/food-supply

[347] https://www.youtube.com/watch?v=6lNz5vmKEFA

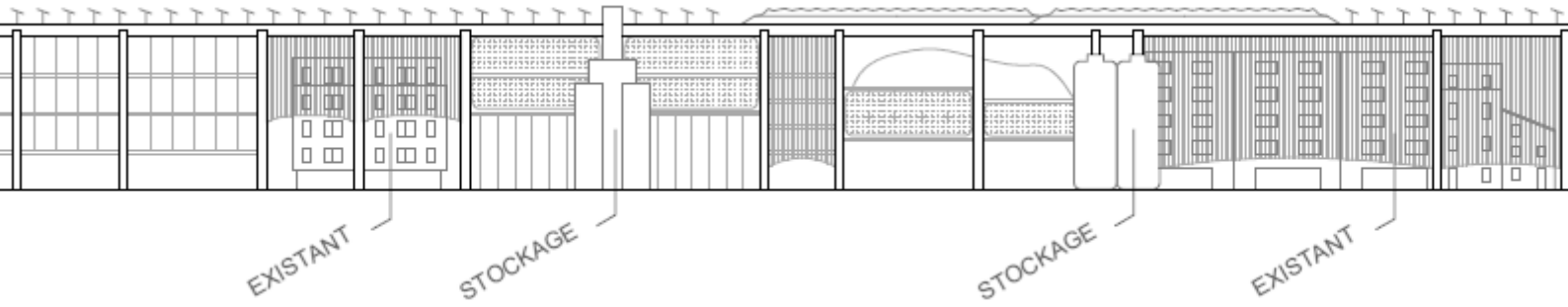
- Cartographie de l'IAU, http://sigr.iau-idf.fr/webapps/visiau/?id_app_visiaurif=32

Synthèse offre-stock-demande

- ETP 2012 data visualisation, IEA, http://www.iea.org/etp/explore/

Autres données

- Infographie sur la densité mondiale, http://persquaremile.com/2011/01/18/if-the-worlds-population-lived-in-one-city/
- Territoire-durable 2030, http://www.territoire-durable-2030.developpement-durable.gouv.fr/
- Sur les silos à grain http://www.lessilosmodernes.fr/
- Le best-of des dataviz sur l'énergie par TSP, http://theshiftproject.org/fr/cet-article/le-best-of-du-dataviz-en-matiere-denergie-et-de-climat
- The World Factbook par la CIA , https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/
- Dashboard de la ville de Londres, http://citydashboard.org/london/


EXISTANT
STOCKAGE
STOCKAGE
EXISTANT